

Charline Dalinghaus

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE DA FORMA EM PLANTA E  
PERFIL NAS PRAIAS DA BARRA DA LAGOA, MOÇAMBIQUE  
E INGLESES, FLORIANÓPOLIS - SC: APLICAÇÕES EM  
ANÁLISE DE PERIGOS COSTEIROS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós  
– Graduação em Geografia da  
Universidade Federal de Santa Catarina  
para obtenção do Grau de Mestre em  
Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Henrique da  
Fontoura Klein

Florianópolis  
2016



Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do  
Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da  
UFSC.

Dalinghaus, Charline

Análise da Estabilidade da Forma em Planta e  
Perfil nas Praias da Barra da Lagoa, Moçambique  
e Ingleses, Florianópolis - SC : Aplicações em  
Análise de Perigos Costeiros / Charline  
Dalinghaus ; orientador, Antonio Henrique da  
Fontoura Klein - Florianópolis, SC, 2016.

200 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade  
Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia  
e Ciências Humanas. Programa de Pós-Graduação  
em Geografia.

Inclui referências

1. Geografia. 2. Clima de Ondas. 3.  
Transporte de Sedimentos. 4. Perfil Praia  
de Equilíbrio. 5. Forma em Planta. I. Klein,  
Antonio Henrique da Fontoura. II.  
Universidade Federal de Santa Catarina.  
Programa de Pós Graduação em Geografia. III.  
Título.



## AGRADECIMENTOS

Nessa longa jornada de mestrado muitos foram os momentos bons e alguns mais difíceis, e por se fazerem sempre presentes, eu gostaria de agradecer algumas pessoas, as quais sem elas, não teria chegado até aqui.

Agradeço primeiramente à minha família, desde o apoio inicial para eu seguir este caminho, até às muitas vezes que eu falei agora vai! Agradeço por me entenderem e estarem comigo em todas as etapas aqui vividas.

Ao meu orientador, Prof. Antonio Klein, por me ensinar, por confiar em mim, por todas as oportunidades dadas e pela paciência. Agradeço pelo incentivo sempre, principalmente nos momentos difíceis. Obrigada por acreditar em mim.

Ao Prof. João Alveirinho Dias por todas as conversas, acadêmicas ou não, e por estar sempre disposto a ajudar.

Aos diversos professores que passaram pelo meu caminho neste período e que, devido às suas sugestões, engrandeceram este trabalho, especialmente aos professores Carla Bonetti, Mauricio González, Andrew Short, Andrew Cooper, Felipe Pimenta, Janete de Abreu e Elírio Toldo Jr.

Aos amigos e colegas do Laboratório de Oceanografia Costeira, pela amizade, ajuda, momentos de discussões e de descontração. Obrigada principalmente à Paula por ser minha amiga e meu braço direito, por estar presente sempre que eu precisei, mesmo estando a um oceano de distância.

A todos aqueles que me trazem alegria e leveza! Com vocês a vida é muito melhor!!

Ao Ministério do Meio Ambiente (MMA) e à Agência Brasileira de Cooperação (ABC) pelo suporte financeiro desta pesquisa através dos projetos SMC-Brasil e MMA-Riscos.



## RESUMO

Este trabalho apresenta resultados da análise da estabilidade da forma em planta e de perfil nas praias dos Ingleses, Barra da Lagoa e Moçambique através de modelagem numérica, diante do conhecimento prévio do clima de ondas local e do transporte litorâneo, sendo estes importantes para o entendimento da dinâmica e processos costeiros e suas aplicações em análises de perigos costeiros à erosão. Primeiramente foi efetuada a análise do clima de ondas da região em frente à Ilha de Santa Catarina utilizando 60 anos de dados de reanálises globais simuladas pelo modelo WWIII (Wave Watch III). Foi calculado parâmetros estatísticos, assim como a correlação dos parâmetros de ondas com índices climáticos a fim de explicar a influência destes no comportamento das ondas da região. A partir do conhecimento prévio do clima de ondas, foi portanto utilizado a ferramenta SMC-Brasil para o cálculo da estabilidade praial através da análise do transporte de sedimentos na zona de surfe utilizando a fórmula do CERC, o perfil praial através da fórmula de Dean(1977) e a forma em planta utilizando a equação parabólica de Hsu e Evans (1989) modificada por González e Medina (2001). Como resultados pôde-se notar uma tendência de aumento nos parâmetros de altura significativa de onda ( $H_s$ ), período de pico ( $T_p$ ) e direção ( $\theta$ ), com um aumento de 16,10 cm, 0,47 s e 9,35° respectivamente. O clima de ondas local (Fluxo de energia, Fluxo de energia direcional,  $H_s$ ,  $T_p$  e alturas de ondas extremas ( $H_{s12}$ )) mostrou correlação significativa com os índices climáticos AAO (*Antarctic Oscillation*), PDO (*Pacific Decadal Oscillation*) e MEI (*multivariate Niño Index*). O transporte de sedimentos em ambas as praias apresentou uma direção predominante para norte apresentando *bypassing* de sedimentos entre enseadas. Por fim, a análise do perfil praial e da forma em planta de ambas as praias demonstraram situações de equilíbrio dinâmico, com uma região de erosão em ambas as praias causada pelo ajuste da linha de costa atual frente às mudanças do clima de ondas.

**Palavras-chave:** Clima de ondas, estabilidade praial, SMC – Brasil.





## ABSTRACT

This work presents analysis results of the headland-bay beach planform and profile stability of the Ingleses, Barra da Lagoa and Moçambique's beaches through numerical modeling, given the prior knowledge of the local wave climate and coastal sediment transport, which are important for understanding dynamics and coastal processes and their applications in analysis of coastal erosion. First it was performed the analysis of the wave climate in front of the Santa Catarina Island using 60 years of global reanalysis data simulated by the model WWIII (Wave Watch III). It was calculated statistical parameters as well as the correlation between wave climate parameters and climate indices to explain their influence on the behavior of the waves in the region. From the previous knowledge of the wave climate, it was then used SMC-Brasil software to calculate the beach stability by performing sediment transport analysis in the surf zone using CERC's formula, beach equilibrium profile through the Dean's formula (1977) and the headland-bay beach planform using the Hsu and Evans' (1989) parabolic equation modified by Gonzalez and Medina (2001). As a result it was noticed an increasing trend in significant waves height ( $H_s$ ), peak period ( $T_p$ ) and direction ( $\theta$ ) parameters, with an increase of 16,10 cm, 0.47 and  $9,35^\circ$  respectively. The local wave climate parameters (energy flux, directional energy flux,  $H_s$ ,  $T_p$  and extreme wave heights ( $H_{S12}$ )) showed a significant correlation with the climate indices AAO (Antarctic Oscillation), PDO (Pacific Decadal Oscillation) and MEI (Multivariate Niño Index). The sediment transport in both beaches showed a predominant direction transport to the north presenting bypassing between headland-bay beaches. Finally, analysis of the beach profile and beach planform shown a dynamic equilibrium situation with an erosion region on both beaches caused by current shoreline adjustments to the changes of the wave climate.

**Keywords:** Wave climate, beach stability, SMC – Brasil.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização das praias da área de estudo. Fonte imagem: Base de dados ESRI (ArcGIS 10.2). Imagem do ano 2010. ....	33
Figura 2 - Características das ondas (Adaptado de Dean e Dalrymple, 1991). ....	42
Figura 3 - Fenômenos de ondas observados próximos a costa: I – Refração; II – Empinamento; III – Reflexão e; IV – Difração (Fonte: MMA, no prelo (a)). ....	43
Figura 4- Componentes primárias envolvidas na morfodinâmica costeira. A retroalimentação entre a morfologia e o movimento do fluido é responsável pela complexidade da evolução costeira (Modificado de Cowell e Thom (1994)). ....	46
Figura 5 - Escala de tempo da morfodinâmica (Modificado de Cowell e Thom (1994)). ....	47
Figura 6 – Zonação de um sistema praial de alta energia (adaptado de Short (1999)). ....	48
Figura 7 – Estados de equilíbrio das formas em planta em praias de enseada. A linha tracejada representa exemplos de cálculo da forma em planta para uma determinada praia. ....	60
Figura 8 - Desenho esquemático demonstrando a definição da equação parabólica nas praias de enseada (Adaptado de Hsu e Evan (1989)). ..	61
Figura 9 - Desenho esquemático demonstrando a definição da relação entre as variáveis $\beta$ e $R_0$ , que são usadas na equação parabólica por Hsu e Evans (1989) e as variáveis $\alpha_{\min}$ e $Y$ usadas na metodologia proposta por González e Medina (2001) (Adaptado de González e Medina, 2001). ....	64
Figura 10 – Estrutura do SMC – Brasil (MMA, no prelo (c)). ....	67
Figura 11 - Exemplo dos resultados de altura significativa obtidos a partir da reanálise global de Hs (MMA, no prelo (a)). Resultados em m. ....	70
Figura 12- Base de dados DOW (em preto) no entorno da Ilha de Santa Catarina. ....	71
Figura 13 - Pontos selecionados para a geração da base de dados de maré astronômica do SMC – Brasil (MMA, no prelo (h)). ....	72

Figura 14 - Mapa da componente de maré $M_2$ calculado com o modelo TPXO (MMA, no prelo (h)).....	73
Figura 15 - Resultados da reanálise GOS de elevação da superfície livre da maré meteorológica no dia 17/12/1992, 6:15, América do Sul (MMA, no prelo (h)). Resultado em m. ....	74
Figura 16 - Pontos selecionados para a geração da base de dados de maré meteorológica do SMC – Brasil (MMA, no prelo (h)).....	74
Figura 17 - Etapas da metodologia seguida no trabalho. ....	79
Figura 18 - Ponto da base de dados DOW (27°42'55"S, 48°10'50,16"O) utilizado na análise do clima de ondas em águas profundas e posição da boia WR 27°42'18"S, 48°8'2,4"O). Profundidade do ponto: 75 m. Profundidade da boia: 80 m. Pontos pretos representam todos os dados DOW disponíveis para essa área.....	81
Figura 19 – Pontos da base de dados DOW utilizados na propagação de ondas de águas profundas para águas rasas. A série do ponto 1 (Prof. 52 m) foi propagada até a praia de Ingleses e a série do ponto 2 (Prof. 75 m) até as praias de Moçambique e Barra da Lagoa. Pontos pretos representam todos os dados DOW disponíveis para essa área.....	84
Figura 20 - Casos selecionados para propagação até a praia da Barra da Lagoa - Moçambique. Em preto os dados da série reduzida, em vermelho os casos selecionados.....	86
Figura 21 - Casos selecionados para propagação até a praia dos Ingleses. Em preto os dados da série reduzida, em vermelho os casos selecionados.....	87
Figura 22 - Passos do processamento da batimetria. Da esquerda para a direita: Batimetria inicial com dados de cartas náuticas; Polígonos isobatimétricos e; Batimetria final suavizada. ....	88
Figura 23 – Localização dos levantamentos sonográficos na Ilha de Santa Catarina realizados pelo projeto MMA-Riscos. Fonte: Klein <i>et al.</i> (2016).....	89
Figura 24 - Batimetria processada: Praia da Barra da Lagoa - Moçambique. ....	90
Figura 25 - Batimetria processada: Praia dos Ingleses.....	91
Figura 26 - Malha 1 para propagação de casos com entrada de norte/nordeste nas praias Barra da Lagoa - Moçambique. Direção de	

entrada de casos principal: 25°N. No detalhe constam as principais informações da malha.....	92
Figura 27 - Malha 2 e aninhada 3 para propagação de casos com entrada de leste nas praias Barra da Lagoa - Moçambique. Direção de entrada de casos principal: 90°N. No detalhe constam as principais informações da malha aninhada (de maior resolução). Espaçamento da malha externa = 100x100.....	93
Figura 28 - Malha 4 para propagação de casos com entrada de sul/sudeste nas praias Barra da Lagoa - Moçambique. Direção de entrada de casos principal: 155°N. No detalhe constam as principais informações da malha.....	93
Figura 29 - Malha 1 e aninhada 2 para propagação de casos com entrada de norte/nordeste na praia dos Ingleses. Direção de entrada de casos principal: 40°N. No detalhe constam as principais informações da malha aninhada (de maior resolução). Espaçamento da malha externa = 100x100.....	94
Figura 30 - Malha 3 e aninhada 4 para propagação de casos com entrada de leste/sudeste na praia dos Ingleses. Direção de entrada de casos principal: 90°N. No detalhe constam as principais informações da malha aninhada (de maior resolução). Espaçamento da malha externa = 100x100.....	94
Figura 31 - Setorização das praias da Barra da Lagoa - Moçambique com base na análise de agrupamento de $H_s$ . Fonte: Modificado de Gomes da Silva (2014).....	96
Figura 32 - Setorização da praia dos Ingleses com base na análise de agrupamento de $H_s$ . Fonte: Modificado de Gomes da Silva (2014). ....	97
Figura 33 - Série temporal de $H_s$ no ponto DOW selecionado. Em preto são as médias mensais de $H_s$ . ....	101
Figura 34 - Série temporal de $T_p$ no ponto DOW selecionado. Em preto são as médias mensais de $T_p$ . ....	101
Figura 35 - Distribuição conjunta de $H_s$ e $T_p$ no ponto DOW selecionado em águas profundas.....	102
Figura 36 - Histograma de $H_s$ (a), $T_p$ (b) e direção (c) no ponto DOW selecionado.....	103

Figura 37 – Rosas direcionais de análises sazonais de ondas do ponto DOW selecionado. ....	104
Figura 38 - Análise de tendência linear para dados anuais médios de $H_s$ . ....	106
Figura 39 - Análise de tendência linear para dados anuais médios de $H_s$ e $H_{s12}$ . ....	107
Figura 40 - Análise de tendência linear para dados anuais médios de $T_p$ e $T_{p12}$ . ....	107
Figura 41 - Fluxo direcional de energia médio para todos os anos analisados. Unidade de fluxo de energia em J/m.s. ....	109
Figura 42 - Correlação entre as variáveis do clima de ondas e os índices climáticos. As caixas pretas representam significância da correlação. ....	110
Figura 43 - Exemplo de caso de onda propagado nas praias da Barra da Lagoa – Moçambique com direção de NE. ....	112
Figura 44 - Exemplo de caso de onda propagado nas praias da Barra da Lagoa – Moçambique com direção de E. ....	112
Figura 45 - Exemplo de caso de ondas propagado nas praias da Barra da Lagoa – Moçambique com direção S-SE. ....	113
Figura 46 - Gráfico de superfície livre: representação do processo de difração por parte do modelo OLUCA – SP nas praias da Barra da Lagoa – Moçambique. ....	114
Figura 47 - Magnitude de correntes – Exemplo de caso com ondas vindas de NNE nas praias da Barra da Lagoa - Moçambique. ....	115
Figura 48 - Magnitude de correntes – Exemplo de caso com ondas vindas de E nas praias da Barra da Lagoa - Moçambique. ....	116
Figura 49 - Magnitude de correntes – Exemplo de caso com ondas vindas de SE nas praias da Barra da Lagoa - Moçambique. ....	117
Figura 50 - Rosas direcionais das séries de ondas reconstruídas nas praias da Barra da Lagoa - Moçambique. No detalhe a rosa de ondas do ponto <i>offshore</i> . ....	118
Figura 51 – Taxas médias anuais de transporte de sedimento para os 4 setores das praias Barra da Lagoa – Moçambique. ....	119
Figura 52 - Evolução do transporte médio anual de sedimentos do setor 1 nas praias da Barra da Lagoa - Moçambique. ....	120

Figura 53 - Evolução do transporte médio anual de sedimentos do setor 2 nas praias da Barra da Lagoa - Moçambique. ....	120
Figura 54 - Evolução do transporte médio anual de sedimentos do setor 3 nas praias da Barra da Lagoa - Moçambique. ....	121
Figura 55 - Evolução do transporte médio anual de sedimentos do setor 4 nas praias da Barra da Lagoa - Moçambique. ....	121
Figura 56 - Perfis de equilíbrio nos 4 setores das praias da Barra da Lagoa - Moçambique. ....	123
Figura 57 - Fluxo de energia direcional para o ponto de difração de onda e para os 4 setores das praias da Barra da Lagoa - Moçambique. ....	124
Figura 58 - Forma em planta da Barra da Lagoa - Moçambique conforme o fluxo médio de energia direcional e a equação de Hsu e Evans (1989). ....	125
Figura 59 - Forma em planta da Barra da Lagoa - Moçambique levando em conta o promontório menor que se encontra entre a praia da Barra da Lagoa e a Prainha, conforme o fluxo médio de energia direcional e a equação de Hsu e Evans (1989). ....	125
Figura 60 - Forma em planta combinada da Barra da Lagoa - Moçambique conforme o fluxo médio de energia direcional, a equação de Hsu e Evans (1989) e levando em consideração que há dois pontos de difração. A área hachurada na segunda imagem identifica a área que está em processo de erosão. ....	126
Figura 61 - Exemplo de caso de onda propagado na praia dos Ingleses com direção de NE. ....	127
Figura 62 - Exemplo de caso de onda propagado na praia dos Ingleses com direção de E. ....	128
Figura 63 - Exemplo de caso de onda propagado na praia dos Ingleses com direção de SE. ....	128
Figura 64 - Gráfico de superfície livre: representação do processo de difração no modelo OLUCA – SP na praia dos Ingleses. ....	129
Figura 65 - Magnitude de correntes - Exemplo de caso com ondas vindas de N na praia dos Ingleses. ....	130
Figura 66 - Magnitude de correntes - Exemplo de caso com ondas vindas de SE na praia dos Ingleses. ....	131

Figura 67 - Rosas direcionais das séries de ondas reconstruídas na praia dos Ingleses. No detalhe a rosa de ondas do ponto <i>offshore</i> . .....	132
Figura 68 – Taxas médias anuais de transporte de sedimento para os 4 setores da praia dos Ingleses. ....	133
Figura 69 - Evolução do transporte médio anual de sedimentos do setor 1 na praia dos Ingleses. ....	134
Figura 70 - Evolução do transporte médio anual de sedimentos do setor 2 na praia dos Ingleses. ....	134
Figura 71 - Evolução do transporte médio anual de sedimentos do setor 3 na praia dos Ingleses. ....	135
Figura 72 - Evolução do transporte médio anual de sedimentos do setor 4 na praia dos Ingleses. ....	135
Figura 73 - Perfis de equilíbrio nos 4 setores da praia dos Ingleses. ..	137
Figura 74 - Fluxo de energia direcional para o ponto de difração de onda e para os 4 setores da praia dos Ingleses. ....	138
Figura 75 - Forma em planta da praia dos Ingleses conforme o fluxo médio de energia direcional e a equação de Hsu e Evans (1989). A área hachurada na segunda imagem identifica a área que está sofrendo erosão. ....	138
Figura 76 – Análise de tendência linear para dados mensais de PDO. ....	142
Figura 77 - Mapa batimétrico das praias da Barra da Lagoa e Moçambique. Fonte: Klein <i>et al.</i> (2016). ....	145
Figura 78 - Batimetria de detalhe no promontório da Ponta das Aranhas. Fonte: Porpilho (2015). ....	146
Figura 79 - Forma em planta futura das praias da Barra da Lagoa - Moçambique (próximos 60 anos). ....	149
Figura 80 - Batimetria de detalhe no costão entre as praias dos Ingleses e a Brava. Fonte: Klein <i>et al.</i> (2016). ....	152



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre métodos de medição de transporte de sedimentos em campo. Adaptado de White (1998).....	53
Tabela 2 - Dados utilizados no presente trabalho.....	80
Tabela 3 – Condições de redução das séries em águas profundas para casos possíveis de se propagar com o modelo OLUCA.....	86
Tabela 4 - Tamanho de grão para os 4 setores das praias Barra da Lagoa - Moçambique e Ingleses. Valores em mm. ....	99
Tabela 5 - Valores de médias, desvio padrão, moda, mediana, máximos, mínimos e tendência linear dos dados de condições médias ( $H_s$ ) e máximas ( $H_{s12}$ ) de altura significativa de onda. ....	104
Tabela 6 - Valores de médias, desvio padrão, moda, mediana, máximos, mínimos e tendência linear dos dados de condições médias ( $T_p$ ) e máximas $T_{p12}$ ) de período de pico. ....	105
Tabela 7 - Valores de médias, desvio padrão e tendência linear dos dados de condições médias de direção de onda ( $\theta_m$ ). ....	108
Tabela 8 – Valores de correlação entre as variáveis do clima de ondas e os índices climáticos. Valores em vermelho representam significância da correlação. Quanto mais próximo de zero menor a correlação. Nível de significância das correlações de 95%. ....	110
Tabela 9 - Variáveis utilizadas e resultado do cálculo da profundidade de fechamento obtidos para as praias analisadas de acordo com Hallermeier (1981). ....	122
Tabela 10 - Tamanho de grão utilizado, parâmetro de escala de sedimentos A calculado e teórico.....	122
Tabela 11 - Variáveis utilizadas e resultado do cálculo da profundidade de fechamento obtidos para as praias analisadas de acordo com Hallermeier (1981). ....	136
Tabela 12 - Tamanho de grão utilizado, parâmetro de escala de sedimentos A calculado e teórico.....	136
Tabela 13 - Valores de correlação entre as variáveis do clima de ondas e os períodos mais fortes de El Niño e La Niña. Valores em vermelho representam significância da correlação. Quanto mais próximo de zero menor a correlação. Nível de significância das correlações de 95%...	143



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAO – *Antartic Oscillation*  
CEM – Manual de Engenharia Costeira  
CERC – *Coastal Engineering Research Center*  
CHM – Centro de Hidrografia da Marinha  
COPLA – Modelo de Correntes Induzidas pela quebra das Ondas nas Praias  
DH – Dimensão na Horizontal  
DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação  
DOW – *Downscaled Ocean Waves*  
DV – Dimensão na Vertical  
E – Leste  
ENOS – El Niño Oscilação Sul  
EROS – Modelo de Evolução Morfodinâmico de uma Praia  
ESE – Leste - Sudeste  
GEBCO – *General Bathymetric Chart of the Oceans*  
GOS – *Global Ocean Surge*  
GOT – *Global Ocean Tides*  
GOW – *Global Ocean Waves*  
IH – Instituto Hidráulico  
INPH – Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias  
LaHiMar – Laboratório de Hidráulica Marítima  
LOC – Laboratório de Oceanografia Costeira  
MaxDiss – Máxima Dissimilaridade  
MC – Monocromático  
MEI – *Multivariate Enso Index*  
MMA – Ministério do Meio Ambiente  
MMT – Módulo de Modelagem do Terreno  
MOPLA – Modelo Integral de Propagação de Ondas, Correntes e Morfodinâmica em Praias  
N – Norte  
NAO – *North Atlantic Oscillation*  
NCAR – *National Center for Atmospheric Research*  
NCEP – *National Center for Environmental Prediction*  
NNE – Norte - Nordeste  
OLUCA – Modelo de Propagação de Ondas  
ONI – *Oceanic Niño Index*  
PDO – *Pacific Decadal Oscillation*  
PETRA – Programa de Evolução do Perfil Transversal de Praias

RBF – *Radial Basis Function*  
ROMS – *Regional Ocean Modeling System*  
S – Sul  
SE – Sudeste  
SSE – Sul – Sudeste  
SMC – Sistema de Modelagem Costeira  
SOI - *Southern Oscillation Index*  
SP – Espectral  
SPM – Manual de Proteção à Costa  
SWAN – *Simulating Waves Near Shore*  
UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina  
UHSLC – Universidade do Havai  
USACE – Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos  
USP – Universidade de São Paulo  
WR – *Waverider*  
WWIII – *Wave watch III*

## LISTA DE SÍMBOLOS

a – Amplitude da onda  
 $a_j$  – Coeficiente de RBF  
A – Amplitude da onda  
A – Parâmetro de escala do sedimento  
C – Celeridade da onda/Velocidade de fase  
C – Concentração de sedimentos em suspensão  
 $C_0, C_1, C_2$  – Coeficientes empíricos  
 $C_g$  – Celeridade de grupo da onda  
 $d_{ij}$  – Distância entre o dado inicial e o subconjunto de casos  
D – Diâmetro do sedimento  
E – Energia da onda  
FE – Fluxo de energia de onda  
g – Aceleração da gravidade  
h – Profundidade da coluna d'água  
h – Variação de nível  
 $h_*$  – Profundidade de fechamento  
H – Altura de onda  
H – Elevação da superfície da água  
 $H_b$  – Altura de quebra da onda  
 $H_s$  – Altura significativa de onda  
 $H_{s12}$  – Altura significativa de onda excedida 12 horas ao ano  
k – Constante adimensional  
k – Índice de quebra  
K – Coeficiente de proporcionalidade empírico  
K – Constante adimensional  
 $K_1$  – Componente luni-solar diurna  
 $K_2$  – Componente luni-solar semidiurna  
L – Comprimento de onda  
 $L_s$  – Comprimento de onda escalar  
m – Expoente que depende como a energia da onda é dissipada  
M – Número de iterações  
 $M_2$  – Componente lunar principal semidiurna  
 $M_f$  – Componente lunar quinzenal  
 $M_m$  – Componente lunar mensal  
n – Porosidade do sedimento  
N – Dado inicial  
 $N_2$  – Componente lunar elíptica maior semidiurna  
 $O_1$  – Componente lunar principal diurna

$p(Z_i)$  – Função de base monomial  
 $P_0$  – Ponto limite da praia a sotamar  
 $P_1$  – Componente lunar principal diurna  
 $q_x$  – Fluxo de sedimentos normal à costa  
 $q_y$  – Fluxo de sedimento paralelo à costa  
 $Q_1$  – Taxa de volume transportado  
 $Q_1$  – Componente lunar elíptica maior diurna  
 $R$  – Subconjunto de casos  
 $R$  – Raios tirados a partir da linha de ondas predominantes ligados a outros pontos ao longo da praia  
 $R_0$  – Raio inicial, linha que une o ponto de controle à parte retilínea da praia  
 $RBF$  – Função de interpolação  
 $S_2$  – Componente solar principal semidiurna  
 $t$  – Tempo  
 $T$  – Período de onda  
 $T_m$  – Período médio de onda  
 $T_p$  – Período de pico de onda  
 $T_s$  – Período significativo de onda associado a  $H_{s12}$   
 $v_j$  – Diversidade do dado  
 $V$  – Ganhos e perdas de sedimentos  
 $X_i$  – Parâmetro do caso analisado  
 $\omega$  – Velocidade de queda do grão  
 $\omega_s$  – Velocidade de queda do grão  
 $y$  – Distância da profundidade  $h$  até a costa  
 $Y$  – Distância do ponto controle até a parte retilínea da praia  
 $Z$  – Caso de ondas em águas profundas  
 $Z_j$  – Caso de ondas em água rasas  
 $\alpha_b$  – Ângulo de quebra da onda relativo à linha de costa  
 $\beta$  – Ângulo formado entre as linhas de crista de ondas predominantes e a linha controle  $R_0$   
 $\Delta t$  – Variação de tempo  
 $\varepsilon$  – Porosidade do sedimento  
 $\theta$  – Ângulo formado entre a linha de crista das ondas e os demais raios  $R$   
 $\theta$  – Direção da onda/ Fluxo de energia de onda direcional  
 $\theta_p$  – Direção de pico da onda  
 $\rho$  – Densidade da água  
 $\rho_s$  – Densidade do sedimento  
 $\sigma$  – Desvio padrão  
 $\sigma$  – Frequência angular  
 $\phi$  – Função de base radial para determinado parâmetro

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>27</b>
1.1. PERGUNTAS DE PESQUISA .....	30
1.2. HIPÓTESE DE PESQUISA .....	30
1.3. OBJETIVOS.....	30
1.3.1. Objetivo geral.....	30
1.3.2. Objetivos específicos.....	30
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	31
<b>2. ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>33</b>
2.1. GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA .....	34
2.2. CLIMA E VENTOS .....	35
2.3. MARÉ, ONDAS E DERIVA LITORÂNEA.....	36
2.4. MORFODINÂMICA.....	37
2.5. EROÇÃO COSTEIRA.....	38
2.6. SÍNTESE: ÁREA DE ESTUDO .....	40
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>41</b>
3.1. HIDRODINÂMICA BÁSICA DE ONDAS NA ZONA COSTEIRA .....	41
3.1.1. Fluxo médio de energia de onda.....	44
3.1.2. Variabilidade do clima de ondas e sua relação com índices climáticos.....	45
3.2. MORFODINÂMICA DE PRAIAS .....	46
3.3. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .....	49
3.3.1. Estimativa do transporte.....	52
3.3.1.1. USACE (1984).....	53
3.4. PRAIAS DE ENSEADA .....	55
3.5. ESTABILIDADE PRAIAL EM PERFIL E EM PLANTA..	56
3.5.1. Perfil de equilíbrio.....	56

3.5.2.	Forma em planta das praias.....	59
3.5.2.1.	Equação da forma em planta.....	60
3.6.	SISTEMA DE MODELAGEM COSTEIRA (SMC) .....	64
3.6.1.	Modelo de propagação de ondas (OLUCA).....	67
3.6.2.	Modelo de correntes por quebra em praias (COPLA)..	68
3.6.3.	Base de dados SMC – Brasil.....	69
3.6.3.1.	Base de dados de ondas .....	69
3.6.3.2.	Base de dados de nível.....	71
3.6.3.3.	Batimetria .....	75
3.7.	SÍNTESE: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	75
<b>4.</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>79</b>
4.1.	ANÁLISE DA VARIABILIDADE DO CLIMA DE ONDAS EM ÁGUAS PROFUNDAS.....	80
4.2.	EXECUÇÃO DOS MODELOS .....	82
4.2.1.	Propagação dos dados de ondas .....	83
	Etapa 1: ESCOLHA DOS PONTOS DOW .....	83
	Etapa 2: SELEÇÃO DE CASOS (MAXDISS) .....	84
	Etapa 3: PROCESSAMENTO DA BATIMETRIA .....	87
	Etapa 4: DEFINIÇÃO DAS MALHAS DE PROPAGAÇÃO .	91
	Etapa 5: PROPAGAÇÃO DAS ONDAS .....	95
	Etapa 6: RECONSTRUÇÃO DA SÉRIE DE ONDAS EM ÁGUAS RASAS (RBF) .....	95
4.2.2.	Setorização das praias .....	96
4.2.3.	Simulação das correntes.....	97
4.2.4.	Análise de longo prazo em praias .....	97
4.2.4.1.	Transporte de sedimentos .....	98
4.2.4.2.	Perfil de equilíbrio .....	98
4.2.4.3.	Forma em planta .....	98



4.2.5.	Sedimentologia.....	99
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>101</b>
5.1.	ANÁLISE DA VARIABILIDADE DO CLIMA DE ONDAS EM ÁGUAS PROFUNDAS ( $h > L/20$ ).....	101
5.1.1.	Estatística descritiva.....	101
5.1.2.	Correlação com índices climáticos.....	109
5.2.	BARRA DA LAGOA – MOÇAMBIQUE.....	111
5.2.1.	Propagação de ondas para águas rasas .....	111
5.2.2.	Simulação de correntes.....	115
5.2.3.	Transporte de sedimentos litorâneos .....	117
5.2.4.	Análise do perfil praial.....	121
5.2.5.	Análise da forma em planta.....	123
5.3.	INGLESES .....	126
5.3.1.	Propagação de ondas para águas rasas .....	126
5.3.2.	Simulação de correntes.....	130
5.3.3.	Transporte de sedimentos litorâneo.....	131
5.3.4.	Análise do perfil praial.....	135
5.3.5.	Análise da forma em planta.....	137
<b>6.</b>	<b>DISCUSSÕES.....</b>	<b>139</b>
6.1.	ANÁLISE DA VARIABILIDADE DO CLIMA DE ONDAS EM ÁGUAS PROFUNDAS .....	139
6.1.1.	Correlação com índices climáticos.....	141
6.2.	BARRA DA LAGOA – MOÇAMBIQUE.....	144
6.2.1.	Transporte de sedimentos litorâneo.....	144
6.2.2.	Análise da estabilidade das praias da Barra da Lagoa - Moçambique em planta e perfil .....	147
6.3.	INGLESES .....	150
6.3.1.	Transporte de sedimentos.....	150
6.3.2.	Análise da estabilidade da praia dos ingleses em planta e perfil .....	152

<b>7. CONCLUSÕES.....</b>	<b>155</b>
7.1. LIMITAÇÕES DESTE TRABALHO.....	156
7.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.	157
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>159</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>176</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>197</b>

## 1. INTRODUÇÃO

As zonas costeiras são ambientes que tendem a buscar a estabilidade de acordo com o clima de ondas que as atinge e isso faz com que estes sejam ambientes altamente dinâmicos (SILVESTER; HSU, 1997). Segundo Bird (2011) essas áreas são ocupadas por mais da metade da população mundial. A intensa ocupação demográfica faz com que as linhas de costa sejam ajustadas às mudanças antrópicas, onde a demanda pelo uso e subsequentemente a pressão por desenvolvimento tornam as zonas costeiras lugares de alto valor econômico.

Praias ocorrem em todas as interfaces mar - terra expostas às ondas onde exista disponibilidade de sedimentos (SHORT, 1999). Definidas por Hoefel (1998) como ambientes primariamente dominados por ondas onde há depósitos de sedimentos não coesivos e inconsolidados, geralmente arenosos, as praias são limitadas internamente pelos níveis máximos de ação de ondas de tempestade (limite de vegetação permanente), pelo início da ocorrência de dunas fixas, ou ainda por alguma alteração fisiográfica brusca; e limitadas externamente pela profundidade de fechamento interna ou então pelo início da zona de arrebentação. Se tratam de ambientes onde o transporte de sedimento é significativo devido ao ajuste entre a topografia da praia e a dinâmica do fluido produzindo variação morfológica. Dessa forma, as praias estão constantemente sofrendo alterações morfológicas resultantes de variações no regime energético incidente (clima de ondas) e desequilíbrios no suprimento sedimentar local (KLEIN, 2004; SHORT, 1999).

Ondas desempenham um papel substancial na modelagem costeira através do transporte de energia de águas profundas para rasas. Elas também influenciam as feições costeiras através do movimento que geram no fluido, de modo que estas variem morfológicamente em diferentes escalas de tempo e espaço (HOLTHUIJSEN, 2007). Parâmetros como altura de onda, período e direção afetam a costa através da quebra das ondas que podem contribuir com a erosão da praia, com a formação de correntes longitudinais e com a elevação do nível do mar (*run-up*) através da soma do espalhamento das ondas na face praial (*swash*) com o empilhamento de água devido à quebra (*set-up*) (IPCC, 2012). Isso se reflete na forma em planta e perfil da praia que dependem da quantidade de sedimento disponível e da capacidade das ondas em redistribuir estes ao longo da costa. Dependem ainda do

tempo necessário para que esse ambiente alcance o equilíbrio (KOMAR, 1998).

Muitos autores tem estudado o clima de ondas, mas nas últimas décadas evidências da variabilidade histórica deste tem se tornado o foco dessas pesquisas (BACON; CARTER, 1991; ALAN; KOMAR, 2000; WOOLF *et al.*, 2002; YOUNG *et al.*, 2011). Estes autores têm apontado, a partir de registros de ondas de longo prazo, um aumento gradual nas alturas de ondas, sendo este aumento ainda maior em casos de eventos extremos. Ainda no início dos anos 1990, Bacon e Carter (1993) deram o primeiro passo no estudo das variações do clima de ondas em larga perspectiva, através da relação deste com índices climáticos. A partir de então, vários estudos foram realizados utilizando altimetria por satélite e modelos numéricos para explorar a variabilidade do clima de ondas em todo o mundo (ALLAN; KOMAR, 2006; DODET *et al.*, 2010; HARLEY *et al.*, 2010; HEMER *et al.* 2007, 2010; MENÉNDEZ *et al.*, 2008; WOOLF *et al.*, 2002), incluindo estudos no Brasil (CAMPOS, 2009; PEREIRA; KLUMB-OLIVEIRA, 2015). Estes estudos acabaram por incitar um interesse significativo em compreender as transformações no clima de ondas como uma resposta à mudanças na circulação atmosférica, especialmente quando tais mudanças climáticas estão ligadas a impactos sociais e econômicos (HARLEY *et al.*, 2010).

Compreender as mudanças no clima de ondas é crítico para determinar as diretrizes de segurança durante as fases de pré-concepção de projectos costeiros e análises preliminares de perigos. Sendo que a intensa ocupação da área costeira pelo homem se torna um problema quando este interfere na dinâmica do local, alterando de alguma forma também o transporte de sedimentos (MUEHE, 2005) e deixando a população vulnerável aos perigos naturais.

Perigos naturais são considerados processos ou fenômenos naturais que ocorrem na biosfera e podem causar degradação ambiental e danos às comunidades expostas (ISDR, 2002). Neste sentido o conceito de perigo abrange fenômenos como ciclones, deslizamentos, tornados, enchentes, marés meteorológicas, entre outros, que podem causar a erosão, por exemplo.

A erosão costeira constitui um dos principais problemas das regiões litorâneas. São muitas as causas para tal processo, entre elas pode-se citar a elevação do nível do mar, a diminuição no fornecimento de sedimentos ao longo do litoral por via fluvial (*e.g.*, retenção de sedimento por barragens e dragagens), degradação antrópica de estruturas naturais (*e.g.*, construção sobre dunas e extração de areia) e

obras de engenharia costeira (e.g., molhes e obras de proteção costeira) (ALVEIRINHO DIAS, 1993).

Muehe (2006) mostra que ao longo de todo o litoral brasileiro há predomínio de processos erosivos sobre os de acreção e equilíbrio e Klein *et al.* (2006) demonstraram que em Santa Catarina não é diferente, onde o principal agente causador da erosão é a ocupação indevida da orla pelo homem, agravada pelas frequentes ressacas que atingem a região durante eventos como tempestades tropicais e extratropicais. Visando avaliar tais eventos extremos, Simó e Horn Filho (2004) identificaram 18 ocorrências de ressaca entre 1991 e 2001 que atingiram a ilha de Santa Catarina. Rudorff *et al.* (2006) apontaram 26 registros de ressaca entre 1997 e 2003 em Santa Catarina. E Krueger (2011) num período de 10 anos (2000-2010) apresentou uma média de seis eventos por ano no litoral catarinense onde um total de 20, nos anos analisados, ocorreram somente em Florianópolis.

As praias da Barra da Lagoa – Moçambique e Ingleses são alguns dos exemplos de praias na ilha de Santa Catarina que estão sofrendo processo erosivo (LEAL, 1999; FARACO 2003; KLEIN *et al.*, 2006; RUDORFF; BONETTI, 2010; BONETTI *et al.*, 2012; MULDER, 2012; KLEIN *et al.*, 2016; VIEIRA DA SILVA *et al.*, 2016a) e em ambas essa condição é agravada onde a intervenção humana é maior, normalmente na zona mais abrigada da enseada.

Praias de enseada são limitadas por promontórios rochosos ou obstáculos físicos, onde a linha de costa geralmente assume forma curvada, podendo desenvolver formas assimétricas (KLEIN *et al.*, 2003). Os estudos realizados neste tipo de praia, como as praias dos Ingleses, Barra da Lagoa - Moçambique, são motivados principalmente pelo interesse em entender as características e evolução destes ambientes pois se percebe que a ocupação desordenada, decorrente da falta de planejamento e conhecimento científico dessas áreas, traz consigo grandes danos ambientais e sociais. Dessa forma, o conhecimento quantitativo e qualitativo da variação dos ambientes praias é essencial para a maioria dos aspectos de planejamento e elaboração de projetos na zona costeira onde modelos numéricos podem ser utilizados como ferramentas para tal. A partir da identificação dos perigos (ondas extremas, por exemplo), o estudo das ocorrências pretéritas e o monitoramento das situações presentes, podem ser eficientes instrumentos de planejamento e gestão costeira, ao definir uma situação de equilíbrio praias, com a proposta assim de diminuir a vulnerabilidade, protegendo a população e seus bens.

Neste contexto, o presente trabalho apresenta uma análise da estabilidade da forma em planta e de perfil nas praias dos Ingleses, Barra da Lagoa e Moçambique através da modelagem numérica, além da caracterização do clima de ondas local e do transporte litorâneo, sendo estes importantes para o entendimento da dinâmica e processos costeiros e suas aplicações em análises de perigos.

### 1.1. PERGUNTAS DE PESQUISA

- Houve mudança no comportamento médio e extremo do clima de ondas na região de estudo entre 1948 e 2008?
- Qual a direção dominante do transporte de sedimentos longitudinal em cada praia?
- O perfil praiial médio se encontra em equilíbrio?
- A forma em planta das praias estudadas, a longo prazo, se encontra em equilíbrio? Qual?

### 1.2. HIPÓTESE DE PESQUISA

O clima de ondas em escala histórica sofreu alterações. As ondas do quadrante sudeste apresentam ocorrências mais frequentes, alterando a posição da separação entre a zona abrigada e a zona exposta das praias de enseadas, dessa forma alterando a posição da linha de costa e os processos ali atuantes.

### 1.3. OBJETIVOS

#### 1.3.1. Objetivo geral

Analisar a estabilidade da forma em planta e do perfil de equilíbrio nas praias da Barra da Lagoa, Moçambique e Ingleses, Florianópolis – SC através de modelagem numérica, além da caracterização do clima de ondas local e do transporte litorâneo, sendo estes importantes para o entendimento da dinâmica e processos costeiros e suas aplicações em análises de perigos.

#### 1.3.2. Objetivos específicos

- Analisar o clima de ondas em frente a ilha de Santa Catarina a partir de dados de 60 anos de reanálise obtidos pelo modelo WWIII;

- Estimar o transporte de sedimentos em escala anual, 1948 a 2008;
- Analisar o perfil de equilíbrio de acordo com a equação de Dean (1977);
- Definir a forma em planta de acordo com a equação de 2º grau de Hsu e Evans (1989), modificada por González e Medina (2001).

#### 1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho será dividido em sete capítulos apresentados como a seguir.

O capítulo 1 – INTRODUÇÃO - compreende a introdução do trabalho com a motivação que o levou a ser realizado. Assim como as perguntas de pesquisa, hipótese e objetivos.

No capítulo 2 – ÁREA DE ESTUDO – é apresentada a área de estudo, suas características físicas e oceanográficas, bem como uma abordagem da erosão costeira no local.

O capítulo 3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA – aborda uma revisão sobre os conceitos bases deste trabalho, como as características das ondas, do transporte de sedimentos, a dinâmica praial e suas formulações. Também se dá uma introdução ao modelo SMC e uma explanação sobre sua base de dados.

No capítulo 4 – METODOLOGIA – descrevem-se os materiais e métodos para alcançar os objetivos propostos, dados utilizados e etapas percorridas.

No capítulo 5 – RESULTADOS – são apresentados os resultados alcançados neste trabalho. Discorre-se sobre o clima de ondas da região, assim como a modelagem de ondas e correntes realizados e suas implicações nos resultados do transporte de sedimentos, forma em planta e perfil das praias.

O capítulo 6 – DISCUSSÃO – apresenta uma discussão aprofundada sobre os resultados encontrados e se estes estão de acordo com o que encontra-se na literatura.

E por fim no capítulo 7 – CONCLUSÕES – se encontram as conclusões finais do trabalho, suas limitações e recomendações para futuros trabalhos.





## 2. ÁREA DE ESTUDO

As praias da Barra da Lagoa – Moçambique e Ingleses se localizam no Município de Florianópolis, litoral central do Estado de Santa Catarina (Figura 1). A praia dos Ingleses se encontra no norte da ilha de Santa Catarina possuindo cerca de 4,5 km de extensão e as praias Barra da Lagoa – Moçambique possuem juntas 12 km de extensão localizadas no leste da ilha.

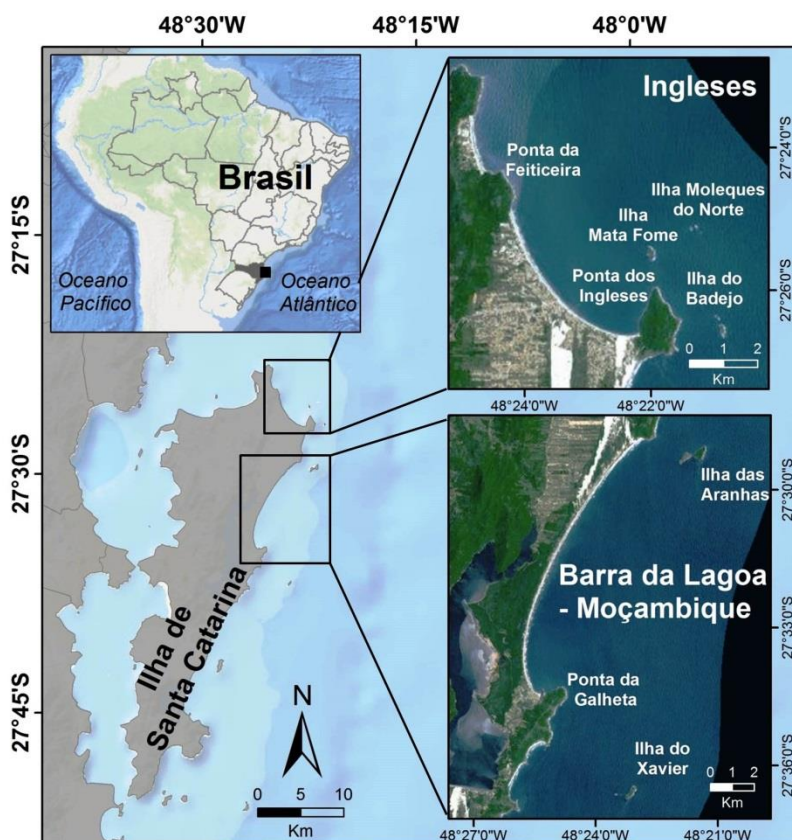


Figura 1 - Localização das praias da área de estudo. Fonte imagem: Base de dados ESRI (ArcGIS 10.2). Imagem do ano 2010.

## 2.1. GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA

Sendo banhada pelo oceano Atlântico Sul, a costa de Santa Catarina pode ser dividida em quatro setores de acordo com a sua geomorfologia (KLEIN, 2004; HESP *et al.*, 2009; KLEIN *et al.*, 2010): (1) Costa de Barreiras (de Passo de Torres ao Cabo de Santa Marta); (2) Costa com Promontórios e Barreiras Cuspidadas (do Cabo de Santa Marta à Enseada da Pinheira); (3) Costa com Promontórios Rochosos e Planície Costeira (da Enseada da Pinheira à Ponta do Vigia) e; (4) Costa com Planície Costeira e Estuários (da ponta do Vigia até a ilha de São Francisco do Sul). A Ilha de Santa Catarina está inserida no 3º setor, o qual é dominado por grandes promontórios do substrato rochoso, reentrâncias e baías. Segundo Caruso Jr. (1993) a geomorfologia da Ilha é formada por uma série de maciços rochosos interligados por áreas planas de sedimentação costeira, sendo os maciços localizados no contexto do soerguimento da Serra do Mar e as áreas planas ocupadas, principalmente, por lagoas costeiras, sistemas de dunas, cordões arenosos e zonas de mangue. O mesmo autor afirma que cordões litorâneos preenchidos com depósitos marinhos praias pleistocênicos e holocênicos predominam nas praias da ilha, sendo que a margem leste, é, ainda, caracterizada pela presença de uma depressão situada intra-cordões geralmente associada a depósitos de turfas, como é possível observar na praia de Moçambique (CARUSO JR., 1993).

A plataforma continental em Santa Catarina apresenta largura entre 130 e 150 km com a quebra a uma profundidade de 130 m (GRÉ, 1989). Corrêa (1980) caracterizou a plataforma continental de Santa Catarina por uma diversidade faciológica peculiar de zona de sedimentação terrígena moderna, progradando sobre uma superfície de areias relíquias quartzosas e biodetríticas, onde a plataforma de Florianópolis, tanto interna como média, apresenta uma textura areno-siltico-argilosa, com tamanho de grão variado entre areia siltica a silte arenoso; e a plataforma externa apresenta uma textura arenosa com granulometria média a muito fina com domínio de quartzo e composta por cascalhos e areias biodetríticas. Esses sedimentos foram afetados pelas flutuações do nível do mar durante os episódios glacio-eustáticos ocorridos a partir do pleistoceno (GRÉ, 1989).

Sobre a granulometria, mais recentemente ambas as praias foram analisadas por diferentes autores (LEAL, 1999; MIOT DA SILVA, 2002; FARACO, 2003; HORN FILHO, 2006; OLIVEIRA, 2009) e tanto a praia dos Ingleses, como a praia da Barra da Lagoa (0,13 – 0,23

cm; 0,16 – 0,23 cm respectivamente) possuem areia fina e a praia do Moçambique possui de areia fina à grossa (0,19 – 0,77 cm).

## 2.2. CLIMA E VENTOS

Santa Catarina é uma região de clima mesotérmico subtropical, sendo o padrão de circulação dominado pelos sistemas atmosféricos: anti-ciclones Tropical Atlântico semi-estacionário e Polar Atlântico migratório, estes influenciados pelo anticiclone Polar do Pacífico Sul e pelo centro de baixa pressão do Chaco (MONTEIRO; FURTADO, 1995). E segundo os mesmos autores a dinâmica que rege essas interações é formada pelos centros de alta pressão originários de baixas latitudes, anticiclones extratropicais e ciclones extratropicais associados à passagem de frentes frias. A Massa Tropical Atlântica, originada do anticiclone Tropical é quente e úmida e predomina durante quase todo o ano, estando relacionada ao tempo estável e ensolarado, que aumenta a temperatura. Esta massa também alimenta a frente quente da Frente Atlântica Polar que predomina durante o inverno.

Os ventos originários da Massa Tropical Atlântica na ilha de Santa Catarina são predominantemente de Nordeste, porém de menor intensidade, mas quando o anticiclone Polar cruza os Andes mais ao sul, em seu giro anti-horário, ele transporta umidade do oceano para o litoral originando ventos frios, úmidos e fortes de Sul e Sudeste, conhecidos em Santa Catarina como “ventos sul”, mais intensos, e caso haja um bloqueio na migração desta frente, o anticiclone desloca-se para leste, mudando a direção dos ventos para as chamadas “lestadas”, períodos marcados por maiores índices pluviométricos (MONTEIRO; FURTADO, 1995). Ainda, dados de velocidade e direção de ventos provenientes de um registro de 34 anos coletados na Estação Meteorológica da Ilha do Arvoredo durante dezembro de 1964 e outubro de 1998, apontam que os ventos de sul são prevaletentes neste período para esta região, ou seja, são os ventos que sopram com maior frequência (VINTEM, 2003; MIOT DA SILVA, 2006). Segundo estes autores e Pinto (2015), o potencial de deriva eólica de sul para norte é significativo ao transportar sedimentos de uma praia à outra através dos campos de dunas encontrados na região.

### 2.3. MARÉ, ONDAS E DERIVA LITORÂNEA

Santa Catarina possui um regime de micro – maré mista, com predominância semi-diurna, tendo uma altura média de 0,8 m com máximas de 1,2 m e mínimas de 0,3 m, podendo alcançar até 1 m acima do nível previsto em condições de marés meteorológicas (TRUCOLLO, 1998, 2006). As marés meteorológicas positivas, isto é, geradoras de uma sobre-elevação do nível do mar na costa sul do Brasil, são decorrentes da ação de eventos de alta energia de onda, associados a fortes ventos e ondulações provenientes de sul/sudeste. As negativas, geradoras de uma diminuição do nível do mar, por sua vez, podem ser associadas a ventos e vagas provenientes de leste-nordeste (CRUZ, 1993).

A costa em Santa Catarina é influenciada por ondas geradas no Oceano Atlântico Sul e governadas pelos movimentos dos ciclones associados com frentes frias e anticiclones vindos da zona Polar. As ondas “swell” (marulhos) geradas nessas condições possuem maiores períodos e são responsáveis pelos maiores volumes de sedimentos transportados. A zona costeira também é atingida por ondas do tipo “sea” (vagas) que são geradas em zonas próximas a terra por ventos locais (ALVES, 1996).

Araujo *et al.* (2003) analisando os dados de altura significativa e direção de onda de um ondógrafo fundeado a 35 km da Ilha de Santa Catarina numa profundidade de 80 metros descreveram a ocorrência de um espectro bi-modal com ondas do tipo vagas provenientes de leste com período de pico ( $T_p$ ) de 8 s e altura média significativa ( $H_s$ ) de 1,25 m e ondas do tipo marulhos provenientes de sul com  $T_p$  de 12 s, aumentando a altura de onda do verão para o inverno, variando de 1,25 a 2 m. Ondas do quadrante sul são predominantes no outono e inverno, ondas do quadrante leste na primavera e, no verão ocorre um balanço de ambas. Miot da Silva *et al.* (2012) através da análise estatística dos dados de dois anos do mesmo ondógrafo utilizado por Araújo *et al.* (2003) demonstraram que há 23,7% de frequência de ondas provenientes de sul e 13,4% de frequência de ondas provenientes de leste-nordeste. Além disto, como registrado por Melo Filho *et al.* (2006), alturas de ondas individuais, de até 13,8 m ( $H_s$  de 7,2 m) já atingiram o litoral de Santa Catarina, causando prejuízos para a população.

Os estudos de corrente de deriva litorânea nas praias oceânicas da ilha ainda são poucos. Cruz (1993) ao realizar testes de deriva na praia

dos Ingleses, em 1992, concluiu que a direção preferencial era para noroeste. A autora ainda relacionou a influência das correntes geradas pelo vento norte às velocidades de até 0,03 m/s e as correntes produzidas pelo vento sul às velocidades superiores a 0,23 m/s. Faraco (1998) na mesma área demonstrou que as maiores velocidades de corrente estiveram relacionadas às ondas provenientes de leste ou a fortes e constantes ventos do quadrante norte, registrando velocidades de 0,01 a 0,30 m/s, não sendo possível identificar a direção predominante. Já Leal (1999) registrou para o sistema praial Barra da Lagoa - Moçambique velocidades de 0,04 a 1,01 m/s, média de 0,47 m/s e direção predominante de norte para sul no período analisado. Diferente da direção de deriva litorânea encontrada por Miot da Silva (2006), predominante de sul para norte. Por fim, Porpilho *et al.* (2015) através da análise de dados de um ADCP Nortek – AWAC fundeado a 21,8 m de profundidade em frente a praia de Moçambique, na região da antepraia demonstraram a ocorrência de correntes bidirecionais no local, onde correntes para o sul (29,07%) prevaleceram sobre as que migram para norte (27,06%), porém ao analisar a magnitude destas, estes verificaram que as correntes para norte se sobressaem, sendo a máxima velocidade medida neste período, 0,6 m/s, próxima ao leito.

Miot da Silva *et al.* (2012), na praia de Moçambique, concluíram que quando ondas de alta energia vindas de sul chegam à costa, o transporte de sedimentos é em direção norte, e a energia de ondas aumenta de sul para norte na praia. Quando ondas de leste-nordeste atingem a costa, o transporte de sedimentos é em direção sul e a energia das ondas diminui de sul para norte. Porém ondas de sul são mais frequentes e produzem um maior potencial de transporte de sedimentos ao longo da costa que ondas de leste.

Por outro lado a forma da praia, a orientação da linha de costa e a presença de um promontório no lado sudeste da praia dos Ingleses, faz desta uma praia totalmente protegida da incidência de ondulações vindas de sul, onde apenas o lado noroeste é atingido por ondulações de sudeste. Porém a praia é totalmente exposta às ondas de incidência leste-nordeste, fazendo com que o setor noroeste seja mais suscetível a mudanças no perfil praial (FARACO *et al.*, 2006).

## 2.4. MORFODINÂMICA

Klein *et al.* (2005) a partir de dados coletados em campo classificaram a praia da Barra da Lagoa - Moçambique como praia

intermediária à dissipativa. Miot da Silva (2006) apresenta uma análise mais aprofundada do local e conclui que a praia varia de muito estável, com largura e zona de surfe curtas e zona de baixa energia dissipativa na parte sul para uma praia estável com largura de praia e zona de surfe maiores e alta energia intermediária – dissipativa na parte norte, com uma zona de maior energia e de estágio morfodinâmico intermediário no meio da praia. Sendo esta morfodinâmica resultado da combinação do tamanho de grão e da exposição da praia em relação à energia de onda, que varia por causa da área abrigada dos promontórios e da orientação da linha de costa. Por fim, Silveira (2008) a partir da análise de imagens de satélite classificou essas praias como intermediárias.

Faraco (2003) ao analisar a praia dos Ingleses, concluiu que a mesma se encontra em estágio intermediário, mas que em campo observou-se um comportamento de praia intermediário a dissipativo. A mesma autora, em 2006, mostra que a praia se apresenta entre os estágios dissipativo e intermediário, segundo a metodologia proposta por Klein (1997) onde a largura da praia aumenta de sudeste para noroeste seguindo a direção predominante da deriva litorânea, enquanto a declividade da praia diminui nesta mesma direção. Já Klein *et al.* (2005) classificaram esta como dissipativa, diferentemente de Silveira (2008) que a classificou como refletiva.

Finalmente, Klein *et al.* (2016) classificaram ambas as praias como estado morfodinâmico variando de terraço de baixamar para refletivo.

Ao estudar a estabilidade, as praias da área de estudo foram classificadas, de acordo com Klein *et al.* (2003) e Silveira *et al.* (2010), como em equilíbrio dinâmico no caso da praia da Barra da Lagoa e como próxima ao equilíbrio estático e em equilíbrio dinâmico, respectivamente, na praia dos Ingleses.

## 2.5. EROSÃO COSTEIRA

Simó e Horn Filho (2004) classificaram as praias deste estudo, com base em risco de destruição e/ou danificação de estruturas devido às ressacas como áreas de alto grau de perigo. Essas praias apesar de estarem protegidas em parte da ondulação mais forte e frequente de sul e sudeste, recebem de forma direta as ondulações de leste e nordeste e por estarem intensamente urbanizadas, os efeitos da ressaca produzem um recuo na linha de costa, atingindo a área urbana.

Nas praias da Barra da Lagoa – Moçambique Leal (1999) e Miot da Silva (2006), com base em monitoramento do perfil praial durante um ano, também indicam que de forma geral está ocorrendo erosão praial. Segundo Leal (1999) esta intensificada no sul, na praia da Barra da Lagoa onde há ocupação antrópica, e na porção central da praia de Moçambique que ocorre de forma natural. O autor ainda lança duas hipóteses sobre a erosão natural, sendo (1) o aumento do nível do mar e; (2) o aumento da frequência de tempestades bem como o aumento da energia destas. Schweitzer (2013) e Dalinghaus *et al.* (2015) também evidenciaram processos erosivos no camping da Barra, região localizada entre as praias da Barra da Lagoa e do Moçambique.

Já Abreu de Castilhos (1995) com base em fotografias aéreas, na praia dos Ingleses, calculou a taxa anual de variação da linha de costa e encontrou um recuo de 0,5m/ano no setor nordeste (mais exposto às ondulações) e um recuo de 0,95m/ano no setor sudeste (protegido pelo promontório). E Faraco (2003) ao monitorar um ano de perfis praias observou de forma geral períodos de acresção de sedimentos porém constatou dois episódios erosivos significativos durante o tempo de monitoramento relacionados de forma direta com as ondulações de leste e norte e maiores alturas das ondas. Resultados apresentados ainda por Faraco *et al.* (2006) demonstram que essa praia apresenta diferentes comportamentos de acordo com a influência de eventos de La Niña e El Niño, sofrendo mais com eventos erosivos em períodos de El Niño.

Klein *et al.* (2016) também evidenciaram que ambas as praias estão sofrendo com processos de retração da linha de costa, o que ocorre em 67% das praias Barra da Lagoa – Moçambique e em 100% da praia dos Ingleses, com uma taxa média de -0,32 m e -0,49 m por ano respectivamente. Estes mesmos resultados são confirmados posteriormente por Vieira da Silva *et al.* (2016a).

Muler (2012) classificou ambas as praias de estudo de acordo com a vulnerabilidade a marés meteorológicas associadas a ondas de tempestades. De acordo com a autora, cerca de 96% da linha de costa da praia dos Ingleses se encontra em situação de vulnerabilidade alta ou muito alta. Por outro lado, a praia da Barra da Lagoa apresentou 12% de vulnerabilidade alta e muito alta na sua porção mais ao sul. De acordo com a autora os setores mais vulneráveis estão associados ao maior grau de urbanização. Por fim Gomes da Silva (2014), a partir do cálculo de valores de cota de inundação, evidenciou que o setor sul da Barra da Lagoa e norte dos Ingleses poderão sofrer com a inundação costeira nos próximos 50 anos, assim como ambos os setores sul poderão apresentar

grandes retrações das linhas costa (máximo de -80,87 m nos Ingleses e -57,84 m na Barra da Lagoa).

## 2.6. SÍNTESE: ÁREA DE ESTUDO

Em síntese, para o estudo da dinâmica praial, é necessário conhecer todas as variáveis que a influenciam. As praias da Barra da Lagoa, Moçambique e Ingleses já apresentam, de forma geral, estudos bastante consistentes sobre tais, os quais têm sido renovados constantemente.

- Sobre a geologia e geomorfologia do local, é importante destacar que os estudos em larga escala são utilizados como primeira informação do local, sendo que recentemente o foco tem sido o detalhamento desses dados, como feições ou substratos, por ex. A forma da praia, a mudança da granulometria e a presença de diferentes substratos são importantes para a estabilidade praial.
- O estudo do clima é bastante aprofundado, porém quase não há estudos sobre a relação de fenômenos, como o El Niño e a La Niña, por exemplo, com a dinâmica praial nesta região. Dados de ventos e estudos da influência destes sobre a transposição de sedimentos entre praias tem se destacado. Ventos vindo de direção sul são os mais intensos e possuem maior capacidade de transporte de sedimento para norte.
- Santa Catarina possui um regime de micro – maré mista, com predominância semi-diurna, ondas tipo vagas provenientes de leste, ondas do tipo marulhos provenientes de sul e deriva litorânea de sul para norte. Apesar de haver estudos e dados sobre maré, ondas e deriva litorânea, estes são poucos, necessitando de maiores séries de dados para um estudo mais preciso tanto do clima em geral como de fenômenos pontuais.
- Há diversos trabalhos sobre a morfodinâmica do local, porém a utilização de diferentes métodos de estudo faz com que não haja um consenso sobre tal denominação. O que se sabe é que a morfodinâmica é resultado da combinação do tamanho de grão e da exposição da praia em relação à energia de onda.
- Por fim, mais recentemente, estudos focados na variação da linha de costa estão sendo realizados, onde todos demonstram que está ocorrendo retração em ambas as praias, seja por métodos naturais ou antrópicos, sugerindo indícios de erosão costeira.



### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1. HIDRODINÂMICA BÁSICA DE ONDAS NA ZONA COSTEIRA

Ondas são manifestações de força que agem sobre um fluido na tentativa de deformá-lo contra a ação da gravidade e a tensão superficial (DEAN; DALRYMPLE, 1991). Se uma força, como o vento, alcança tal objetivo, são geradas ondas que se propagam através de uma superfície por distâncias e tempo muito maior que o seu comprimento e período original (HOLTHUIJSEN, 2007).

Há diferentes tipos de ondas no oceano, as quais são definidas principalmente pelo seu período e comprimento (HOLTHUIJSEN, 2007). Segundo Young (1999), as ondas de gravidade geradas pelo vento são as de maior ocorrência, e consequentemente, a principal forma de transmissão de energia no mar. Essas ondas são, dessa forma, caracterizadas por seu período de 0,25 – 30 s e comprimento correspondente de 0,1 – 1500 m (em águas profundas) e são classificadas como vagas, ondas irregulares geradas por vento local; e marulhos, ondas regulares geradas em campos de vento distantes (HOLTHUIJSEN, 2007). Dessa forma, as ondas dependem da intensidade do vento, do tempo em que o vento sopra sobre a superfície do mar, do tamanho da área afetada (*fetch*) e de qual direção o vento sopra para se formarem (MMA, no prelo (a)).

Ondas possuem forma sinusoidal (segundo a Teoria de Airy ou teoria linear) sendo que como importantes definições estão a sua altura, comprimento e a profundidade em que está sendo propagada, onde a partir daí, todos os outros parâmetros podem ser definidos (DEAN; DALRYMPLE, 1991). A Figura 2 demonstra uma onda sendo propagada na direção x de forma bidimensional, onde:

L: Comprimento da onda. Distância entre duas cristas sucessivas (ou duas cavas);

T: Período da onda. Tempo que duas cristas (ou cavas) passam pelo mesmo ponto;

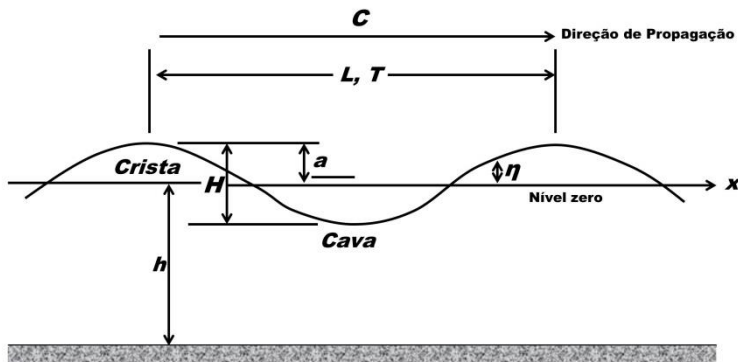
C: Celeridade da onda; Velocidade de fase. É a velocidade de propagação da onda ( $C=L/T$ );

h: Profundidade da coluna d'água;

H: Altura da onda. É a diferença vertical na altura da crista da onda e da cava;

a: Amplitude da onda. É a metade da altura da onda, a distância vertical entre a altura da crista da onda (ou cava) com o nível médio do mar;

H: Elevação da superfície da água.



**Figura 2 - Características das ondas (Adaptado de Dean e Dalrymple, 1991).**

Apesar de importante, o parâmetro altura de onda não é comumente utilizado, e sim o parâmetro altura significativa de onda ( $H_s$ ), o qual é definido como a média de um terço das maiores ondas, assim como o seu período associado ( $T_p$ ) (HOLTHUIJSEN, 2007). Segundo o mesmo autor,  $H_s$  é comumente utilizado por ser um valor medido próximo ao visualmente estimado.

Quando se aproximam de águas rasas, as ondas geradas pelo vento, propagadas desde águas profundas, são afetadas por fenômenos como a reflexão, difração, refração e empinamento, que alteram suas propriedades (VAN RIJN, 1998). Esses fenômenos fazem com que as ondas sofram transformações na altura, período e direção de propagação devido a interações com o fundo e com obstáculos. Kamphuis (2000) e Holthuijsen (2007) definem esses fenômenos como:

- Reflexão: Ocorre quando as ondas propagadas encontram um obstáculo e retornam em direção oposta ao original;
- Difração: Giro das ondas para áreas com menores amplitudes devido à mudanças de amplitude ao longo das cristas das ondas. É o desvio ou espalhamento da onda ao contornar ou transpor um obstáculo, sendo a difração mais intensa quanto menor for o comprimento da onda em relação ao tamanho do obstáculo;

- Refração: Redução da velocidade do avanço das ondas devido a mudança de direção em águas rasas por causa da profundidade ou de correntes. Ao se aproximarem da costa as cristas das ondas tendem a se alinhar paralelamente com a batimetria, tornando a direção da onda perpendicular a linha de costa.
- Empinamento: Mudança na altura (aumento) e comprimento da onda (diminuição) ( $H/L$  = Esbeltez da Onda) em resposta a alterações na velocidade de propagação de energia (a chamada velocidade de grupo) de um trem de ondas a fim de manter o fluxo médio de energia. Ocorre devido a variação da profundidade.

Na Figura 3 é possível observar esses fenômenos.



**Figura 3 - Fenômenos de ondas observados próximos a costa: I – Refração; II – Empinamento; III – Reflexão e; IV – Difração (Fonte: MMA, no prelo (a)).**

Por fim, quando a esbeltez da onda atinge um limite máximo, ou seja, a altura aumenta e o comprimento diminui até um limite físico, a onda quebra e dissipa a energia (KAMPHUIS, 2000). E de acordo com

o mesmo autor, a diminuição súbita na altura da onda é definida como o ponto de quebra.

Além de transportar energia, ondas também transportam *momentum*. Este transporte de *momentum* age como um tensor horizontal na água (tensor de radiação), onde os gradientes agem como forças que podem gerar um declive na superfície da água (*set-up* ou *set-down*) ou uma corrente.

### 3.1.1. Fluxo médio de energia de onda

Segundo a teoria linear das ondas, ao se propagarem sobre a superfície do oceano, as ondas não transportam massa, mas sim energia através do fluido (DEAN; DALRYMPLE, 1991).

A energia de uma onda é a soma de duas energias: (1) cinética, que é a energia referente ao movimento orbital das partículas de água e; (2) potencial, energia das partículas como resultado do deslocamento de sua posição de equilíbrio (OPEN UNIVERSITY, 1999). Já a taxa de transmissão de energia pelo fluido é denominada fluxo de energia (HOLTHUIJSEN, 2007).

Fluxo de energia de onda é uma taxa de transferência de energia que é transmitida na direção de propagação das ondas através de um plano vertical perpendicular ao avanço da direção de onda e estendido por toda a profundidade (USACE, 2002a). O fluxo médio de energia por unidade de largura de crista de onda (FE) é expresso como (Eq. 1):

$$FE = EC_g = \frac{\rho g H^2 C_g}{16} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde  $E$  é a energia da onda,  $\rho$  é a densidade da água ( $\text{kg/m}^3$ ),  $g$  é a aceleração da gravidade ( $9,8\text{m/s}^2$ ),  $H$  é a altura da onda (m) e  $C_g$  é a celeridade de grupo ( $\text{m/s}$ ). A energia é dada em  $\text{J/m.s}$ .

A partir do fluxo médio de energia, calcula-se a direção (Eq. 2 e 3) deste, o qual coincide com o vetor número de onda, que por sua vez, tem a mesma direção da onda. É esta direção que define a orientação da forma em planta de equilíbrio da praia, objeto de interesse nesse trabalho.

$$FE_{x,i} = FE_i \cos(\theta_i); \quad FE_{y,i} = FE_i \sin(\theta_i); \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\theta = \arctan \left( \frac{\sum_i F_{y,i}}{\sum_i F_{x,i}} \right) \quad (\text{Eq. 3})$$

Neste trabalho, a definição de fluxo direcional de energia de onda é a mesma que direção média de onda ( $\theta$ ).

### 3.1.2. Variabilidade do clima de ondas e sua relação com índices climáticos

Um índice climático pode ser definido como um valor usado para descrever o estado e as variações do clima. Existe uma ampla variedade de índices descritos na literatura derivados de diferentes indicadores, como o gradiente de pressão atmosférica, a temperatura do ar, temperatura da superfície do mar, entre outros. De forma geral, no sul do Brasil, o Índice de Oscilação Sul (Southern Oscillation Index – SOI), o Índice de Oscilação Decadal do Pacífico (Pacific Decadal Oscillation – PDO) e o Índice de Oscilação Antártica (Antarctic Oscillation – AAO) são os índices mais comumente estudados por causa da sua maior influência nessa área.

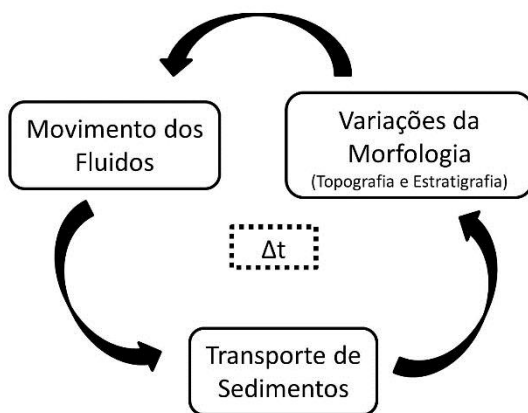
O SOI é um índice que se baseia nas diferenças de pressão ao nível do mar observadas entre Tahiti e Darwin – AUS (leste e oeste do Pacífico Tropical) durante episódios de El Niño e La Niña (ROPELEWSKI; JONES, 1987). Em geral, séries temporais do SOI correspondem bem com mudanças na temperatura dos oceanos, onde a fase negativa do SOI representa a pressão do ar abaixo do normal no Tahiti e acima do normal em Darwin. Períodos prolongados da fase negativa do SOI coincidem com águas anormalmente quentes no mar leste do Pacífico tropical, típico de episódios de El Niño, ocorrendo o oposto em período de La Niña. Além do SOI, há também outros índices utilizados para medir o El Niño Oscilação Sul (ENOS), como o ONI (*Oscillation Niño Index*) baseado na temperatura da superfície do mar e o MEI (*Multivariate ENSO Index*) baseado em 6 diferentes variáveis medidas no Pacífico Tropical.

Já a PDO é uma oscilação semelhante ao ENOS, também baseado na temperatura da superfície do mar, porém com período mais longo (20 a 30 anos em comparação com 6 - 18 meses do ENOS) e mais visível nos extratropicais (MANTUA; HARE, 2002). Durante sua fase positiva o Pacífico oeste esfria e o leste se torna mais quente, fase em que há maior influência do El Niño, enquanto que na fase negativa ocorre o contrário e há a maior influência da La Niña.

Por fim, a AAO se refere a uma alternância de grande escala de pressão de massas atmosféricas entre médias e altas latitudes (Antártica) (GONG; WANG, 1999). Por possuir variação intrasazonal e interanual, esta oscilação acaba interferindo na posição e intensidade dos jatos subtropicais e consequentemente nos ciclones e anticiclones. Na fase positiva da AAO há maior atividade ciclônica em médias latitudes com deslocamento para o norte, ocorrendo o oposto na fase negativa. Quando a AAO é positiva, também a intensidade e ocorrência de anticiclones pode aumentar.

### 3.2. MORFODINÂMICA DE PRAIAS

Morfodinâmica é o ajuste mútuo entre a topografia e a dinâmica do fluido envolvendo o transporte de sedimento (WRIGHT; THOM, 1977). Tais autores definem o ambiente costeiro como um sistema geomorfológico dinâmico, onde há entradas e saídas de energia e matéria bem definidas, sendo estas controladas pelas condições ambientais, onde a evolução costeira é o produto destes processos, tanto atuais como passados (herança geológica), em resposta às mudanças nas condições externas (Figura 4).



**Figura 4- Componentes primárias envolvidas na morfodinâmica costeira. A retroalimentação entre a morfologia e o movimento do fluido é responsável pela complexidade da evolução costeira (Modificado de Cowell e Thom (1994)).**

O tempo necessário para que ocorra o ajuste morfológico é definido como tempo de resposta, o qual depende do nível de energia que atinge a região, da mobilidade dos sedimentos e da escala espacial das feições morfológicas (COWEL; THOM, 1994).

Cowell e Thom (1994) ainda agruparam em quatro grandes classes a escala de tempo nas quais esses processos e consequentemente a evolução costeira ocorrem: (1) Escala de Tempo Instantânea (ação de ondas, marés, ventos); (2) Escala de Tempo de Eventos (eventos extremos como tempestades, variações sazonais); (3) Escala de Tempo de Engenharia ou Histórica (varia de anos a séculos) e; (4) Escala de Tempo Geológica (décadas a milênios) (Figura 5).

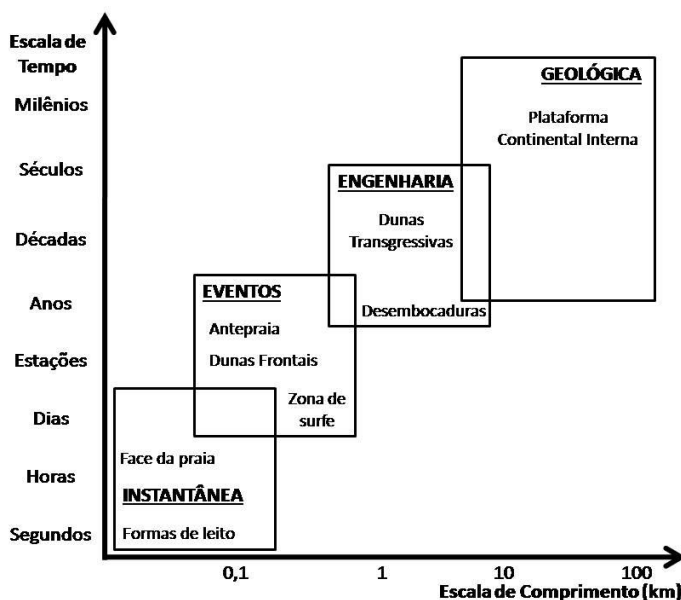
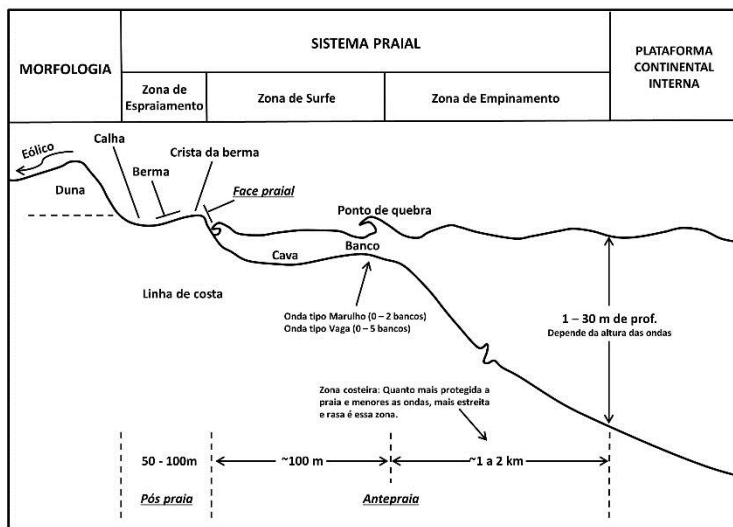


Figura 5 - Escala de tempo da morfodinâmica (Modificado de Cowell e Thom (1994)).

Por variar espaço-temporalmente, a morfodinâmica das praias é determinada de acordo com a natureza e extensão da zonação hidrodinâmica e morfológica das mesmas (HOEFEL, 1998; SHORT, 1999), as quais são classificadas como (Figura 6):



**Figura 6 – Zonação de um sistema praiial de alta energia (adaptado de Short (1999)).**

### Zonação Hidrodinâmica

**Zona de Empinamento:** Região onde a onda começa a sentir o fundo (profundidade de fechamento) e se deformar até a sua quebra;

**Zona de Surfe:** Região onde ocorre o processo de quebra da onda (deslizante, mergulhante, ascendente ou frontal) e este domina a geração de correntes e o transporte de sedimentos até a região onde a onda colapsa e espraia;

**Zona de Espraçamento:** Região desde onde a onda colapsa até onde o seu espraçamento alcança, é identificada como aquela onde ocorre o máximo fluxo e o mínimo refluxo da onda.

### Zonação Morfológica

**Antepraia:** Porção do perfil que se estende desde o limite da plataforma continental interna até o limite do *run-up*;

**Face Praial:** Região onde domina o processo de espraçamento da onda, estendendo-se a partir da elevação da maré baixa até o máximo do espraçamento;

**Pós-Praia:** Região entre o limite superior do espraçamento (algumas vezes da crista da berma) e a base da duna frontal ou outra



feição fisiográfica. Nesta região domina a ação do vento em condições normais e durante eventos de tempestade é inundada e modificada pela ação das ondas.

### 3.3. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

O transporte de sedimentos no ambiente costeiro acontece através da combinação de processos hidrodinâmicos como ventos, ondas e correntes. Ele ocorre quando forças que estabilizam o grão em repouso são excedidas por forças desestabilizadoras geradas pelo fluido (ar, água, gelo) em movimento. Sendo a resposta à troca de *momentum* (massa X velocidade) entre o sedimento e o fluxo, o início da movimentação da partícula sedimentar irá ocorrer a partir do momento em que a força gerada pelo atrito for maior que a força de inércia da partícula, movimentando esta por rolamento, saltação ou suspensão (VAN RIJN, 1993). É considerado no transporte de sedimentos o movimento dos sedimentos tanto no fundo quanto em suspensão.

Transporte de sedimentos no fundo é dominante em áreas onde as correntes principais são relativamente fracas se comparadas ao movimento das ondas, sendo determinado pela tensão de cisalhamento do fundo sobre os grãos onde a taxa de transporte é frequentemente calculada como função do parâmetro de Shields. Já o transporte de sedimentos em suspensão domina quando as forças das correntes de marés e induzidas pelo vento aumentam, causando turbulência e consequentemente o cisalhamento na camada limite, sendo assim produto da velocidade do fluido e da concentração de sedimentos. Os sedimentos em suspensão são causados também por vórtices nas microondulações (VAN RIJN, 1998; AAGAARD; MASSELINK, 1999).

As características que podem influenciar o transporte de sedimentos são a viscosidade, densidade, velocidade, deformação, densidade relativa, inércia e o tipo de fluido (newtoniano ou não newtoniano), além do tamanho, densidade, composição, características do agregado, velocidade de sedimentação, ângulo de repouso, forma e permeabilidade do grão (USACE, 2002b). Segundo Van Rijn (1993) a transferência de energia na praia, as forças inerciais e de atrito são afetadas diretamente pelas propriedades dos fluidos sendo que a taxa de transporte dependerá diretamente da taxa de movimento do fluido, como a sua velocidade e aceleração.

A ação de ondas, marés e de correntes influencia o transporte sedimentar e a morfologia praial. Dos agentes transformadores da morfologia e perfil praial, destaca-se a ação das ondas incidentes, capazes de retrabalhar e redistribuir o sedimento inconsolidado transportando-o perpendicular ou longitudinalmente ao longo da linha de costa, resultando em processos deposicionais e erosivos (HOEFEL, 1998). O fluxo de energia de onda aumenta com a corrente longitudinal que contribui com o transporte de sedimentos ao longo da praia. Assim sendo, pode-se dizer que a magnitude e a distribuição tanto da corrente quanto do transporte longitudinal é dado em função das ondas incidentes e das características da praia (BAILARD, 1981).

Ao se aproximarem de regiões de águas rasas, as ondas sofrem transformações por empinamento, refração e difração. Estes fenômenos condicionam o fluxo de energia que entra na praia, tanto em magnitude, quanto em direção e resultam no estabelecimento de padrões de circulação costeira, que são fundamentais no transporte de sedimentos próximo à costa, ocasionando a perda da energia da onda e modificações morfológicas da linha de praia. Também a quebra da onda, que determina o modo que a onda é dissipada e transformada em turbulência, é importante na geração de correntes e nas mudanças da morfologia praial (MMA, no prelo (b)).

Short (1999) indica que o tamanho do grão, juntamente com as ondas, controla a dinâmica da praia. Segundo o mesmo autor, a composição das areias das praias é dominada por grãos de quartzo, porém variações regionais e locais no tipo do sedimento são produzidas por clima, rochas fonte e biota. O sedimento disponível irá determinar as dimensões globais da praia e as mudanças na quantidade (balanço de sedimentos) irão afetar o tamanho e a ocorrência dos mesmos. Variações no tamanho de sedimento podem impactar a morfodinâmica da praia.

De acordo com Fontoura (2004), o transporte de sedimentos pode ser dividido em dentro e fora da zona de arrebentação. De menor intensidade, o transporte fora da zona de arrebentação fica restrito ao movimento oscilatório das partículas junto ao fundo por causa das correntes geradas pela flutuação dos campos de pressão da própria onda. Já a zona de arrebentação é a região de maior interesse no que se refere à estabilidade e evolução de uma praia, pois é nesta zona que a quebra da onda ressuspende uma grande quantidade de sedimentos, sendo estes, suscetíveis ao transporte pelas correntes geradas por ondas. Nesta zona, as correntes mais importantes são geradas pela energia dissipada da quebra da onda associada aos gradientes longitudinais de altura de onda e a direção de incidência da mesma em relação à linha de costa. São

geradas correntes costeiras tanto em sentido transversal (correntes de retorno), quanto em sentido longitudinal (VAN RIJN, 1998; MMA, no prelo (b)). O transporte longitudinal na zona de arrebentação é também conhecido como deriva litoral (VAN RIJN, 1998).

Diferentemente, o transporte transversal, que acontece ao longo do perfil, é resultado do movimento da água devido à ação das ondas em ataque frontal e correntes de retorno. Essas correntes são alimentadas por correntes longitudinais próximas à praia e tendem a extinguir-se logo após a zona de surfe, em direção ao mar, formando células de circulação. E o transporte longitudinal, que ocorre paralelamente à costa, acontece devido às correntes longitudinais geradas pela arrebentação das ondas que incidem obliquamente à praia. A formação e a intensidade destas correntes estão também associadas à variação longitudinal da altura de arrebentação da onda. Caso as ondas atinjam a praia de forma paralela, a circulação no interior da zona de surfe se desenvolve na forma de correntes de retorno. A maré, ondas, correntes, tamanho e tipo de grão, declividade do fundo e a intensidade e direção dos ventos são os principais fatores que determinam a magnitude do transporte sedimentar (KOMAR, 1983).

Ponto chave em qualquer estudo de praias, a correta determinação do transporte longitudinal é quem condiciona a evolução temporal da mesma (MMA, no prelo (b)). O transporte longitudinal é descrito como um dos principais processos costeiros de controle da variação da morfologia praial, determinando a propensão à erosão, acresção ou a estabilização da linha de costa (USACE, 2002b). Através da deriva litorânea, as correntes, por possuírem maiores dimensões e serem contínuas geralmente proporcionam fluxos longitudinais de sedimentos maiores que fluxos transversais, ocorrendo inclusive *bypassing* de sedimentos na presença de obstáculos como promontórios ou molhes. Nestas condições a ação da corrente torna-se visível, pois o sedimento que não conseguir atravessar esse obstáculo ficará acumulado ao lado da estrutura, permitindo que se possa observar esta ação (COWELL, 1986 *apud* AAGARD; MASSELINK, 1999). Propagadas fora da zona de surfe, o transporte por correntes funciona como fonte externa de sedimento, auxiliando assim em processos de longa escala (*e.g.* migração de desembocaduras e ilhas-barreiras).

Apesar do transporte de sedimentos ser o principal mecanismo de integração entre a morfologia e o movimento do fluido, é o balanço de sedimentos resultante do transporte que causa erosão e deposição na praia, que define sua forma final. O balanço de sedimentos é descrito

pela equação da continuidade para o transporte (VAN RIJN, 1993) (Eq. 4).

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \varepsilon \left( \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) - \frac{\partial V}{\partial t} \quad (\text{Eq. 4})$$

onde:

$h$  é a variação de nível no tempo a cada par de pontos (x, y).  
Representa diminuição no caso de erosão e aumento no caso de acresção.

$q_x$  é o fluxo de sedimentos normal à costa

$q_y$  é o fluxo de sedimentos paralelo à costa

$C$  é a concentração de sedimentos em suspensão

$V$  são os ganhos e perdas de sedimentos

$\varepsilon$  é a porosidade do sedimento.

Num sistema real esta é uma forma de calcular o transporte de sedimentos quando os fluxos de entrada e saída são conhecidos.

### 3.3.1. Estimativa do transporte

O transporte de sedimentos é muito complexo de ser estudado pois depende de muitos parâmetros, sendo de difícil medição em campo. Dessa forma, muitos dos modelos matemáticos, físicos e empíricos são derivados de estudos em rios e correntes, na tentativa de inserir o efeito das ondas posteriormente (VAN RIJN, 1993).

As medições em campo podem se dar relacionando as características do grão (*e.g.* tamanho de grão, grau de selecionamento) com o padrão de migração deste, onde se sugere que o transporte ocorra no sentido em que os grãos se tornam mais finos e a seleção dos grãos aumenta quanto maior for a distância da área fonte. Para tal utilizam-se traçadores, ou seja, materiais que possuem características que permitem rastrear o percurso do grão, como a presença de minerais pesados ou grãos marcados com tinta; armadilhas de suspensão e de fundo; métodos acústicos e ópticos, entre outros (WHITE, 1998). Cada método possui suas limitações, mas é certo que as medições de campo podem ser facilitadas com a escolha certa do instrumento. Na Tabela 1 é apresentada uma breve revisão sobre os métodos de obtenção de parâmetros para calcular o transporte de sedimentos em campo (WHITE, 1998). Segundo o mesmo autor, os cálculos das taxas de transporte a partir de medições de campo possuem quase sempre o

mesmo princípio, procura-se integrar verticalmente dados de concentração de sedimentos, densidade e velocidade.

**Tabela 1 - Comparação entre métodos de medição de transporte de sedimentos em campo. Adaptado de White (1998).**

	Armadilhas de grande porte	Bombas para transporte em suspensão	Amostradores de Suspensão	Armadilhas de pequeno porte	Traçadores	Ópticos	Acústicos	Impacto	Condutividade	Radiação
Fundo	X				X			X	X	
Suspensão de Fundo	X	X	?	?	X	X	X	X	X	
Suspensão	X	X	X	X		X	X		X	X
Medições Pontuais		X	X	X	X	X	X	X	X	X
Medições Globais	X				X					
Longitudinal	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Transversal		X	X		X	X	X	X	X	X
Concentração		X	X			X	X		X	X
Velocidade					X		X			
Transporte	X			X	X		X	X		
Acurácia	A	M	M	M	M	A	A	B	M	M
Custo Relativo	C	B	B	B	C	M	C	M	M	C

X: Indica os métodos que possuem tal característica;

A: Boa acurácia (entre 10-30%)

M: Acurácia moderada (entre 30-60%)

I: Sem acurácia (confiabilidade apenas na direção do transporte)

C: Cara, M: Moderada; B: Barata

De acordo com Kamphuis e de Briand (1993 *apud* TAIANI, 2010) existem três tipos de modelos para o cálculo do transporte de sedimentos: (1) Modelos globais, que calculam a taxa de transporte e a direção (*e.g.* fórmula do CERC para transporte longitudinal e Bruun-Dean (1954, 1977) para transporte através do perfil); (2) Modelos intermediários, que relacionam características de fluxo com características de movimento incipiente e; (3) Modelo detalhados, modelos matemáticos computacionais, onde parâmetros detalhados podem ser acrescentados e os resultados finais interpretados de forma ágil e precisa. Entre estes encontra-se o SMC – Brasil, que será detalhado mais a frente.

O SMC – Brasil utiliza dentre as suas formulações para o cálculo do transporte de sedimentos, o modelo proposto por USACE (1984 *apud* USACE, 2002b) para análise em longo prazo.

### 3.3.1.1.USACE (1984)

Uma das mais utilizadas fórmulas hoje, a fórmula do CERC (*Coastal Engineering Research Center*, como é conhecida), do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE, sigla em inglês) foi apresentada em 1984 no Manual de Proteção à Costa (SPM), hoje

atualizada no Manual de Engenharia Costeira (CEM) (USACE, 2002b). Ela relaciona potência transmitida paralelamente à costa com capacidade de transporte, sendo obtida empiricamente através da utilização de dados de diversas praias nos Estados Unidos, no México e no Japão, constituídas por grãos de quartzo com diâmetro característico variando de 0,2 a 1,0 mm. A fórmula relaciona parâmetros de onda com teorias de dispersão de energia, porém não levando em consideração a declividade do perfil (Eq. 5):

$$Q_l = K \left( \frac{\rho \sqrt{g}}{16k^{\frac{1}{2}}(\rho_s - \rho)(1-n)} \right) H_b^{\frac{5}{2}} \sin 2\alpha_b \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde:

$Q_l$  é a taxa de volume transportado ( $\text{m}^3/\text{dia}$ )

$K$  é um coeficiente de proporcionalidade empírico ( $K = 1,4e^{(-2,5D_{50})}$ )

$k$  é o índice de quebra

$\rho_s$  é a densidade do sedimento

$\rho$  é a densidade da água

$g$  é a aceleração da gravidade

$n$  é a porosidade do sedimento

$H_b$  é a altura de quebra de onda

$\alpha_b$  é o ângulo de quebra de onda relativo à linha de costa

Esta fórmula, apesar de amplamente utilizada, pode superestimar o transporte para uma elevada energia de onda, porém é uma das mais consistentes, apresentando resultados aceitáveis para quase todos os locais que é utilizada (KAMPHUIS, 2000).

Por fim, os cálculos de transporte de qualquer modelo partem do pressuposto que há uma quantidade infinita de sedimento disponível na zona costeira, sendo que isso quase não acontece nos ambientes reais. O que essa fórmula mede portanto, é uma taxa de transporte potencial que pode ocorrer em algum momento onde o sedimento esteja disponível em grande quantidade. Para a taxa de transporte real é preciso conhecer todas as entradas e saídas de sedimentos do ambiente estudado, ou seja, o cálculo do balanço sedimentar. Fontes de entrada de sedimentos podem ser descargas fluviais, material erodido de dunas, alimentação praial artificial, entre outras, e sumidouros podem estar associadas ao transporte pelo vento de sedimento depositado na duna em direção a costa, fora da área de atuação das ondas os sedimentos carregados em

direção ao mar além da extração de areia antrópica (KAMPHUIS, 2000; USACE, 2002b).

### 3.4. PRAIAS DE ENSEADA

Uma linha de costa arenosa limitada por afloramentos rochosos ou promontórios, naturais ou antrópicos, onde esta assume uma forma curva é a definição usada para praias de enseada (KLEIN, 2004). Na maior parte dos casos, essas praias assumem formas assimétricas caracterizadas por uma zona de sombra curvada, uma zona no meio com curvatura suave e por fim uma zona relativamente reta onde as ondulações predominantes atingem a praia de forma paralela a linha de costa (SILVESTER; HSU, 1997). Essa forma curvilínea na área abrigada é gerada pela difração das ondas nos promontórios, podendo gerar também saliências ou tômbolos, quando há a presença de ilhas, recifes de coral ou estruturas introduzidas pelo homem próximas à praia (HSU; EVANS, 1989). Já a orientação e a forma geral das praias de enseada são controladas pelo padrão de refração associado com a chegada das ondulações predominantes (SHORT, 1999).

Praias de enseada são encontradas em todas as latitudes e assumem a forma de equilíbrio em curva como consequência do balanço de fornecimento de sedimentos, da capacidade das ondas de redistribuir esse sedimento ao longo da costa e do tempo para que a linha de costa encontre o equilíbrio, levando de anos a décadas para tal (KLEIN, 2004; HSU *et al.*, 2008).

Short e Masselink (1999) indicam que o comprimento e o espaçamento dessas praias dependem da topografia rochosa pré-existente que foram parcialmente inundadas pela transgressão do nível do mar no Holoceno onde as regiões baixas dos vales foram preenchidas por sedimentos enquanto as regiões mais altas permaneceram como promontórios e/ou costas rochosas. Possuindo essa forma devido à interação entre os promontórios naturais, as ondulações persistentes e os ventos gerados localmente.

Em praias de enseada, como há variação no grau de exposição às ondas ao longo da praia, elas podem assumir diferentes características morfodinâmicas em diferentes pontos (KLEIN, 2004). A região protegida tende a ser mais refletiva, uma vez que está sujeita a ondas menores. Já a região mais distante do promontório tende a ser mais retilínea e dissipativa, podendo apresentar sistemas de bancos múltiplos na porção submersa desse segmento praial (SHORT, 1999). Entretanto,

Klein e Menezes (2001) sustentam que tanto nas regiões protegidas como nas expostas, o tipo de praia depende do tamanho do grão de sedimento disponível.

### 3.5. ESTABILIDADE PRAIAL EM PERFIL E EM PLANTA

O conceito de equilíbrio em praias de enseada é ligado à estabilidade, tanto do perfil quanto da forma em planta da praia. Bruun (1953, *apud* HSU *et al.*, 2008) definiu que uma linha de costa se encontra em equilíbrio quando ela mantém sua forma geométrica. Por outro lado, Tanner (1958, *apud* HSU *et al.*, 2008) descreveu uma praia em equilíbrio como sendo aquela que possui um perfil de equilíbrio perpendicular a qualquer ponto da linha de costa com uma curvatura de equilíbrio em um plano horizontal.

#### 3.5.1. Perfil de equilíbrio

Apesar da sua estabilidade, as praias de enseada podem ser erodidas muito rapidamente, em questão de horas, e isto não é uniforme, variando com o ângulo de ataque das ondas. Por essa razão é necessário considerar o equilíbrio do perfil praial quando se fala de estabilidade de praias. Há muito, pesquisadores têm um grande interesse em encontrar um parâmetro simples que descreva o movimento de sedimento incipiente perto da praia. Para tentar suprir essa necessidade foi desenvolvido o conceito de Perfil Praial de Equilíbrio.

O perfil praial de equilíbrio é definido como a resultante do balanço entre forças construtivas e destrutivas que ocorrem em condições de ondas estacionárias, para um tipo de sedimento em particular (DEAN, 1991). Segundo o mesmo autor, o perfil da praia depende da granulometria presente, pois o transporte transversal é função das ações hidrodinâmicas, das dimensões e do peso das partículas. Ao mesmo tempo em que a onda será afetada pelas mudanças no perfil, esta responde a batimetria do local, mostrando assim que existe uma relação de equilíbrio entre a dinâmica marinha e a morfologia do perfil.

Várias abordagens foram apresentadas na tentativa de caracterizar o perfil praial de equilíbrio e Bruun (1954 *apud* DEAN, 1991) analisando praias na Califórnia encontrou uma simples relação para tal (Eq. 6):



$$h(y) = Ay^{\frac{2}{3}} \quad A = k * \omega_s^{0,44} \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde  $h$  é a profundidade através da costa em uma determinada distância  $y$ ;  $A$  é um parâmetro de escala de sedimentos (depende das características do sedimento);  $k$  é uma constante adimensional ( $k = 0,51$ ) e  $\omega_s$  é a velocidade de queda do grão.

A velocidade de queda do grão, para areias de densidade  $\rho_s = 2065 \text{ g/cm}^3$ , é obtida através das seguintes expressões:

$$\begin{aligned} \omega (m/s) &= 1,1 * 10^6 D^2 (m) & D < 0,1 \text{ mm} \\ \omega (m/s) &= 273 D^{1,1} (m) & 0,1 < D < 1 \text{ mm} \\ \omega (m/s) &= 4,36 D^{0,5} (m) & D > 1 \text{ mm} \end{aligned}$$

onde  $D$  é o diâmetro do sedimento.

Bruun (1954 *apud* MMA, no prelo (b)) sugeriu três mecanismos para descrever o perfil de equilíbrio:

- O perfil é formado pela tensão de cisalhamento devido à ação das ondas na direção normal/perpendicular a costa;
- A variação da tensão de cisalhamento, por unidade de área de fundo, é constante;
- A perda de energia por metro quadrado de superfície de fundo é constante.

Dean (1977 *apud* DEAN, 1991) ao reavaliar o perfil de equilíbrio proposto por Bruun (1954 *apud* DEAN, 1991) considerou a dissipação da energia uniforme não por unidade de área, mas por unidade de volume. Este autor ao analisar 504 perfis de praia da costa Atlântica e do Golfo nos Estados Unidos utilizou o procedimento dos mínimos quadrados para ajustar a equação proposta por Bruun (1954 *apud* DEAN, 1991) anteriormente (Eq. 7):

$$h = Ay^m \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde  $m$  é um expoente que depende de como a energia da onda é dissipada, fornecendo a forma do perfil (côncavo, convexo ou linear), e encontrou o valor de  $2/3$  confirmando a equação.

Dessa forma, o conceito de perfil praiar de equilíbrio surgiu com Dean (1991) que definiu as quatro características básicas de um perfil de equilíbrio:

- Possui a tendência de ser côncavo para cima;
- Menor tamanho de sedimento resulta em uma declividade mais suave, e vice versa;
- Possui face praial;
- Ondas com acentuada declividades resultam em um perfil com baixa declividade.

No processo de interação entre as ondas e o sedimento, o perfil do declive praial tende a tomar uma forma fixa correspondente ao clima de ondas. Um período suficientemente longo de ação das ondas resulta no estabelecimento de um perfil de equilíbrio, o qual permanece praticamente imutável até que o regime de ondas comece a mudar. A forma do perfil de equilíbrio é uma função dos parâmetros de onda e das características físicas dos grãos do sedimento sendo a principal limitação desse modelo a incapacidade de refletir feições morfológicas como barras ou degraus (LARSON *et al.*, 1999).

A partir de certa profundidade o perfil de equilíbrio já não responde da mesma forma à ação das ondas, profundidade esta que o transporte de sedimento transversal e longitudinal não é mais expressivo. Conhecida como profundidade de fechamento, ou limite do perfil ativo, esta pode ser estimada pelas seguintes equações (Eq. 8, 9 e 10):

$$\text{Birkemeier (1985): } h^* = 1,75H_{S12} - 57,9 \left( \frac{H_{S12}^2}{gT_s^2} \right) \quad (\text{Eq. 8})$$

$$\text{Hallermeier (1978): } h^* = 2,28H_{S12} - 68,5 \left( \frac{H_{S12}^2}{gT_s^2} \right) \quad (\text{Eq. 9})$$

$$\text{Hallermeier (1981): } h^* = 2H_{S12} + 11\sigma \quad (\text{Eq. 10})$$

Onde  $H_{S12}$  é a altura de onda significativa excedida 12 horas ao ano,  $T_s$  é o período significativo associado a  $H_{S12}$ ,  $g$  é a aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ ) e  $\sigma$  é o desvio padrão da altura de onda.

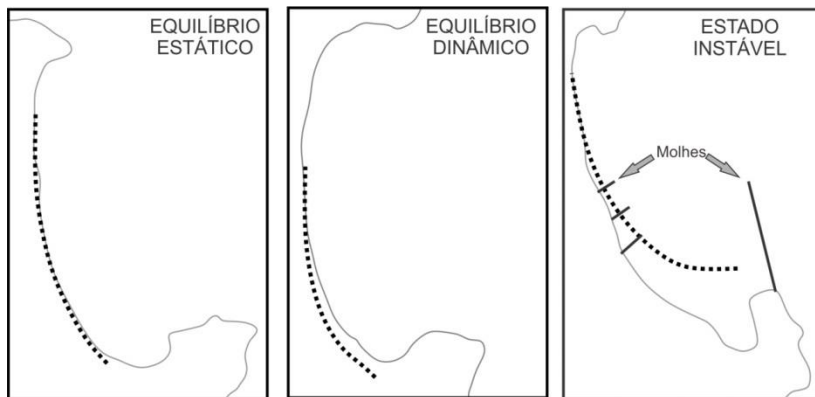
É importante ainda destacar que na equação de Dean a forma do perfil depende única e exclusivamente do tamanho de sedimento através do parâmetro  $A$ , enquanto que as ondas fornecem a profundidade de fechamento do perfil,  $h^*$ . Desse modo, uma praia de areia apresentará uma declividade mais suave que uma praia de cascalho. Seguindo o mesmo padrão, uma praia aberta, ou seja, exposta a um frente de onda mais energética, apresentará um perfil ativo mais prolongado do que em uma praia protegida.

Por fim, estudos realizados no mar da Cantabria, Espanha (MMA, no prelo (b)) demonstraram que o valor do coeficiente  $k$  pode variar entre 0,55 e 0,65 e Almeida (2013) ao testar valores mais realistas para a praia de Piçarras, SC, chegou ao valor de  $k=0,61$ . Dessa forma podem-se ajustar os valores de  $k$  também para a costa sul do Brasil.

### 3.5.2. Forma em planta das praias

De acordo com González e Medina (2001) o que governa a forma em planta de uma praia é principalmente as correntes induzidas pelas ondas, a quantidade de sedimento existente, o tamanho de grão e os limites da praia. Correntes longitudinais são muito importantes na disposição do equilíbrio praiar e, mais precisamente, na forma em planta, dada a sua importância no transporte potencial de sedimentos.

O equilíbrio da forma em planta pode ser estático, dinâmico ou instável com remodelamento natural (SILVESTER; HSU, 1997; HSU *et al.*, 2010) (Figura 7). Segundo os autores, praias de enseada em equilíbrio estático (estáveis) são aquelas onde as ondas predominantes entram paralelas à linha de costa e quebram da mesma forma em toda a praia por isso quase não existe deriva litoral ou correntes longitudinais, sendo assim não é necessário um aporte de sedimentos para manter a mesma estável (assume-se que não há entrada ou saída de sedimentos da baía). Já praias de enseada em equilíbrio dinâmico necessitam de uma fonte de sedimentos para evitar erosão da linha de costa, esta podendo ser da deriva litoral ou de dentro da enseada, sendo que todo o aporte sedimentar que entra é posteriormente perdido com a dinâmica, mantendo-se assim o sistema estável. E por fim as praias com remodelamento natural são instáveis normalmente por ter ocorrido alguma alteração antrópica no ambiente, como a construção de um espigão, fazendo com que haja uma deposição diferente de sedimentos, remodelando a forma da praia.



**Figura 7 – Estados de equilíbrio das formas em planta em praias de enseada. A linha tracejada representa exemplos de cálculo da forma em planta para uma determinada praia.**

Resultados apresentados por Klein *et al.* (2010) mostram que o estágio da estabilidade da forma em planta de uma praia é independente de outros tipos de classificação de praias, como os estágios morfodinâmicos e as orientações destas. E Miot da Silva *et al.* (2006) reportam que não existe uma relação clara entre a estabilidade da forma em planta, tamanho de grão ao longo da costa e distribuição de ondas.

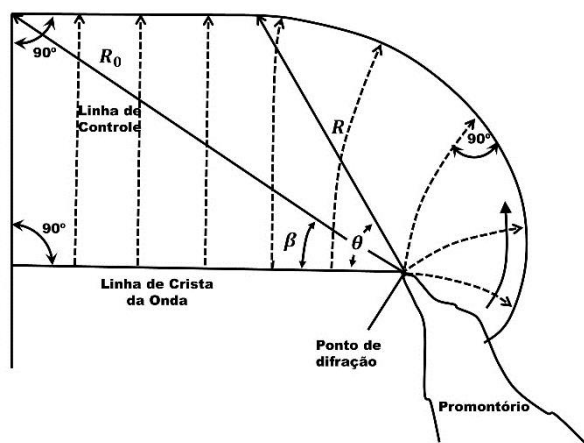
### **3.5.2.1. Equação da forma em planta**

O conceito de equilíbrio da forma em planta de praias de enseada foi introduzido por Krumbein (1944 *apud* HSU *et al.*, 2010) e desde então distintas funções matemáticas tem sido propostas para o ajuste da curvatura destas. A equação da espiral logarítmica (KRUMBEIN, 1944 *apud* HSU *et al.*, 2010; YASSO, 1965 *apud* HSU *et al.*, 2010), a equação parabólica (HSU; EVANS, 1989; SILVESTER; HSU, 1997; HSU *et al.*, 2008) e a equação da tangente hiperbólica (MORENO; KRAUS, 1999; MARTINO *et al.*, 2003) são equações empíricas que conseguem prever a forma da linha de costa em planta dessas praias assumindo diferentes sistemas de coordenadas, origens e parâmetros de controle relacionadas a geometria da enseada.

Em 1989, Hsu e Evans desenvolveram a equação parabólica da forma em planta (Eq. 11), polinômio de segunda ordem testada em 27 casos entre protótipos e baías que se acreditavam estarem em equilíbrio estático:

$$\frac{R}{R_0} = C_0 + C_1 \left( \frac{\beta}{\theta} \right) + C_2 \left( \frac{\beta}{\theta} \right)^2 \quad (\text{Eq. 11})$$

onde  $R_0$ , ou raio inicial, é a linha que une o ponto de controle localizado no promontório rochoso onde se inicia o processo de difração de ondas até a extremidade final da parte retilínea da praia;  $R$ , são os raios tirados a partir da linha de ondas predominantes ligados a outros pontos ao longo da periferia da praia;  $\beta$ , é o ângulo formado entre as linhas de crista de ondas predominantes e a linha controle  $R_0$ ;  $\theta$ , é o ângulo formado entre a linha de crista de ondas e os demais raios  $R$ ; e  $C_0$ ,  $C_1$  e  $C_2$ , são os coeficientes gerados a partir de análises de regressão dados em função do ângulo  $\beta$  em questão (Figura 8).



**Figura 8 - Desenho esquemático demonstrando a definição da equação parabólica nas praias de enseada (Adaptado de Hsu e Evan (1989)).**

Para usar a fórmula, relativamente pouca informação é necessária, mas a determinação dos pontos de controle deve ser feita de forma cuidadosa, partindo da interpretação e compreensão da morfologia costeira, observada em imagens aéreas e mapas. O ponto de difração é definido como último ponto onde a ondulação incidente sofre difração antes de chegar à praia. O final da praia é definido como sendo o final da porção retilínea da costa (quando ausente, é assumido como sendo o fim da praia) e a direção de onda é definida como a tangente a

esse ponto (à porção retilínea). Com a definição desses pontos, a equação gera a forma em planta estável da praia, definida pela ação da direção de onda indicada, em condição de balanço sedimentar nulo. O modelo é aplicável para regiões classificadas como costa dominada por ondas e com regime de micro-marés (HSU; EVANS, 1989).

Sendo a única equação que utiliza parâmetros da geometria da baía e da dinâmica, como o ponto de difração e a direção predominante de onda, a equação de Hsu e Evans (1989) é a que possui maiores aplicações na detecção da modificação da linha de costa em função da alteração do ponto de difração (*e.g.* obras de engenharia costeira) ou da direção das ondulações mais energéticas.

Muitos autores confirmam que a equação parabólica da forma em planta é uma ferramenta adequada no estudo da estabilidade de praias de enseada (HSU *et al.*, 2008; BOEYINGA, *et.al.*, 2010; KLEIN *et al.* 2010; OLIVEIRA; BARREIRO, 2010). Sendo particularmente útil neste tipo de estudo pois permite a verificação da estabilidade da praia de enseada através da comparação da linha de costa existente com a prevista, que corresponde ao equilíbrio estático da forma em planta e quando aplicada a praias em equilíbrio estático pode prever a forma em planta de uma praia quando introduzidas obras costeiras, como molhes e quebra-mares (OLIVEIRA; BARREIRO, 2010). O modelo de equação parabólica criado por Hsu e Evans (1989) relaciona as mudanças na linha de costa com a ponta do promontório ou o ponto de difração das ondas fazendo com que mesmo que haja alteração antrópica no local, este novo ponto de controle possa ser calculado (HSU *et al.*, 2010).

Essa fórmula foi desenvolvida e é aplicada sob determinadas condições: (1) A praia esteja em equilíbrio estático (pois a deriva litoral característica de praias em equilíbrio dinâmico é difícil de ser estimada); (2) Exista um ponto de difração de onda bem definido; (3) Que o segmento praial seja relativamente curto e reto; (4) Batimetria uniforme sem influência de bancos de areia; (5) Que seja um ambiente de micro-maré e (6) Submetida a um marulho predominante ou ondas geradas localmente pelo vento por uma direção quase constante (HSU *et al.*, 2010).

Ao estudar diversas praias da Irlanda do Norte, Jackson e Cooper (2010) fizeram algumas observações sobre a aplicação do conceito de equilíbrio de forma em planta, sendo estas: (1) Subjetividade na seleção do ponto de difração; (2) Variabilidade temporal na localização do ponto de difração como resultado de mudanças nas condições de ondas e marés; e (3) Subjetividade na seleção do ponto de controle a sotamar (e consequentemente no ângulo de chegada das ondas). Ou seja, a variação

natural dos sistemas costeiros faz com que diversos locais possam ser escolhidos como ponto de difração. Neste caso, um conhecimento histórico da área de estudo é de suma importância.

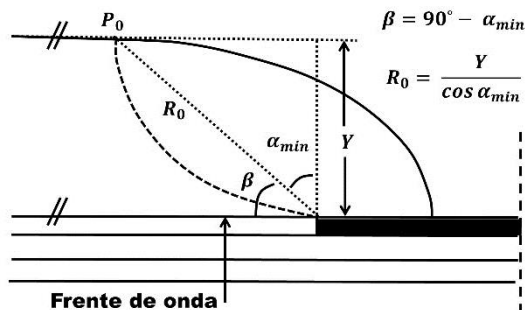
Justamente devido a essa problemática, González e Medina (2001) propuseram uma nova maneira de localizar esses pontos de controle utilizando o fluxo de energia. Esse método é ainda mais preciso se houver dados batimétricos e de ondas pois o  $\beta$  é calculado com base nas características predominantes de ondas (altura e período) no ponto de difração, ao invés de ser aferido por imagens aéreas, o que conta apenas pela geometria e direção de onda (OLIVEIRA; BARREIRO, 2010). Em concordância Hsu *et al.* (2010) afirmam que no caso de uma análise quantitativa detalhada sobre o modelo de equação parabólica é necessário a informação sobre o fluxo de energia de onda.

O modelo apresentado por González e Medina (2001) (Figura 9), aplicado em diversas praias da Espanha tanto na costa Mediterrânea como na costa do Atlântico com bons resultados, teve como premissas que:

- A orientação da frente de onda no ponto de difração que deve ser usada na aplicação da equação de Hsu e Evans (1989) corresponde à frente do fluxo médio de energia das ondas nesse mesmo ponto;

- O limite sotamar (parte retilínea), ponto  $P_0$ , pode ser fixado usando a relação  $\alpha_{min} = f\left(\frac{Y}{L_s}\right)$  e;

- O equilíbrio estático da linha de costa em enseadas pode ser obtido usando o modelo parabólico de Hsu e Evans (1989) começando em  $P_0$ . Os parâmetros  $\beta$  e  $R_0$  são então definidos como:  $\beta = 90^\circ - \alpha_{min}$  e  $R_0 = \frac{Y}{\cos \alpha_{min}}$ , onde  $Y$  é a distância do ponto controle até a parte retilínea da praia e  $L_s$  é o comprimento da onda escalar calculado com base em parâmetros das frentes de onda que atingem a praia.



**Figura 9 - Desenho esquemático demonstrando a definição da relação entre as variáveis  $\beta$  e  $R_0$ , que são usadas na equação parabólica por Hsu e Evans (1989) e as variáveis  $\alpha_{min}$  e  $Y$  usadas na metodologia proposta por González e Medina (2001) (Adaptado de González e Medina, 2001).**

Dessa maneira a forma em planta pode ser obtida seguindo ainda as determinadas condições: (1) Os gradientes longitudinais de altura de ondas são governados apenas pelo ponto de difração controle e pela refração da praia (*e.g.*: difração por ilhas não são representadas); (2) Apenas correntes longitudinais associadas com as correntes induzidas pelas ondas são importantes e; (3) Existe apenas um ponto de difração (GONZÁLEZ; MEDINA, 2001).

Por fim, Oliveira e Barreto (2010) ao estudar 42 praias em Portugal, a maioria delas em equilíbrio dinâmico, constataram que apesar do modelo parabólico de forma em planta ser utilizado para praias em equilíbrio estático, a alta dinâmica encontrada nesses sistemas praias com intensa troca de sedimentos faz com que estas praias se adaptem rapidamente a condição estática, sendo assim, adequadas para o uso do modelo.

### 3.6. SISTEMA DE MODELAGEM COSTEIRA (SMC)

Na intenção de proporcionar uma metodologia para projetar, executar e monitorar projetos costeiros, estabelecer uma estratégia na prevenção de erosão costeira, estimar riscos de inundação costeira e compilar a experiência Espanhola no campo de engenharia costeira foi criado pelo Instituto de Hidráulica Ambiental (IH CANTABRIA) da Universidade da Cantábria, Espanha, um *software* onde estivesse incluso toda a informação e formulações necessárias para resolver tal questão. Ferramenta esta que permitiria analisar a funcionalidade e a



estabilidade da praia em diferentes escalas de tempo. Foi criado então o Sistema de Modelagem Costeira (SMC) (GONZÁLEZ *et al.*, 2007). Consistindo de diferentes ferramentas numéricas para o cálculo de propagação de ondas, correntes, transporte de sedimentos, estabilidade do perfil e da forma em planta praial, entre outros, o SMC, a partir de 2002, juntamente com seus manuais específicos, começou a ser implementado também em outros países (GONZÁLEZ *et al.*, 2007).

Em 2010, através de um acordo entre os governos brasileiro e espanhol de cooperação técnica, científica e tecnológica para executar o projeto “Transferência de Metodologias e Ferramentas de Apoio à Gestão da Costa Brasileira”, com o objetivo de

“contribuir para uma melhor gestão da costa brasileira, permitindo, dentre outros, a transferência de metodologias e ferramentas e a formação de recursos humanos especializados para entender e propor soluções para os problemas de erosão que ocorrem em quase 40% da costa brasileira, estudar problemas de impacto ambiental, delimitar zonas de domínio público e privado ao longo do litoral permitindo recuperar espaços públicos já ocupados e proteger as populações em áreas de risco”,

foi então criado o SMC – Brasil (MMA, 2013).

Embora o principal produto tenha sido o *software*, vale destacar que o Sistema de Modelagem Costeira também envolve a formação de pessoal, a disponibilização de dados em escala nacional, instrumentalização de gestores públicos com técnicas de proteção e gestão do litoral que facilite a tomada de decisões, geração de subsídios para licenciamento, estudo, desenho e elaboração de alternativas para projetos de engenharia costeira e a elaboração de documentos temáticos sobre o assunto (MMA, 2013).

O SMC – Brasil é, portanto, uma ferramenta computacional, que combina um conjunto de metodologias, modelos numéricos e uma base de dados sólida para o estudo de processos costeiros (MMA no prelo (c)). Ele é dividido em duas ferramentas (Figura 10):

- SMC Tools, dividida em três módulos principais: (1) IH-DATA, que inclui uma base de dados de ondas, nível e batimetria; (2) IH-AMEVA, ferramenta de análise estatística das variáveis ambientais e; (3) IH-DYNAMICS, módulo que permite realizar a transferência de uma série de ondas indefinidas para pontos na costa (MMA, no prelo (d)).

- SMC 3.0, o qual integra uma série de modelos numéricos permitindo dar suporte prático a correta aplicação da metodologia de trabalho proposta nos documentos temáticos. Estes são estruturados de acordo com as escalas espaciais e temporais de curto, médio e longo prazo. Também inclui um módulo de regeneração do terreno para atualização da batimetria e topografia (MMA, no prelo (c)). O SMC 3.0 é dividido em módulos de análise, de curto e longo prazo.

➤ Módulo de análise em curto prazo de praias:

Módulo de análise em escala espacial e temporal curta. Consiste em modelos de evolução morfodinâmica no perfil 2DV (2 dimensões na vertical) e em planta 2DH (2 dimensões na horizontal). O primeiro, conhecido como Petra (Programa de evolução do perfil transversal de praias), permite calcular a evolução do perfil de praias após a dinâmica de ondas sobre um nível de maré variável no tempo. Este modelo não será abordado neste trabalho. Já o segundo, conhecido como MOPLA (Programa de morfodinâmica de Praia), modela, através de seis modelos numéricos (OLUCA MC/SP, COPLA MC/SP, EROS MC/SP), a evolução morfodinâmica das praias a partir da simulação de ondas, correntes, transporte de sedimentos e a evolução da batimetria. Esses modelos são divididos em dois grupos: (1) MC, modelagem dos processos associados à propagação de um trem de ondas monocromáticas e; (2) SP, modelagem de propagação de um estado do mar representado por um espectro de energia de ondas. Neste trabalho foram utilizados os modelos espectrais por serem mais precisos no cálculo de altura de ondas, apesar de exigirem um maior custo computacional, e desta forma obter com grande precisão os regimes de ondas em uma zona da costa.

➤ Módulo de análise em longo prazo de praias:

Módulo de análise em escala espacial e temporal longa. Possui o programa de praias em equilíbrio onde é possível calcular o perfil praiial de equilíbrio e a forma em planta da praia. A edição da batimetria (Módulo de Modelagem do Terreno, MMT) também se encontra neste módulo.

Mais detalhes sobre os modelos podem ser encontrados em MMA, no prelo (c) (Manual do Usuário – SMC 3.0), no prelo (d) (Manual de Referência – SMC Tools), no prelo (e) (Manual de Referência - OLUCA), no prelo (f) (Manual de Referência - COPLA), no prelo (g) (Manual de Referência – EROS).



**Figura 10 – Estrutura do SMC – Brasil (MMA, no prelo (c)).**

### 3.6.1. Modelo de propagação de ondas (OLUCA)

O OLUCA - SP é um modelo de propagação de ondas espectral de refração e difração que inclui os efeitos de empinamento, refração, dissipação de energia por fricção com o fundo e pela quebra da onda, difração e interação onda-corrente, simulando o comportamento de ondas sobre batimetrias irregulares (GONZÁLEZ *et al.*, 2007).

O modelo OLUCA-SP resolve as transformações de águas profundas para intermediárias e rasas pela equação do declive suave, desenvolvida por Radder (1979) e posteriormente adaptada por Booij (1981) (Eq. 12). A discretização espacial ocorre através de um esquema de diferenças finitas, sendo possível o aninhamento de malhas (MMA, no prelo (e)).

$$C_g \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial y} + i(\bar{k} - k)C_g A + \frac{\sigma}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{C_g}{\sigma} \right) A - \frac{i}{2\sigma} \frac{\partial}{\partial y} \left[ p \frac{\partial A}{\partial y} \right] - \sigma k^2 D |A|^2 \frac{A}{2} = 0 \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde:

$C_g$  = Celeridade de grupo

$A$  = Amplitude da onda

$k$  = Número de onda de referência, tomado como a média ao longo do eixo  $y$ .

$p = CC_g$

$C$  = Celeridade da onda

$D$  = Parte do termo não linear e definido como (Eq. 13):

$$D = \frac{\cosh 4kh + 8 - 2 \tan h^2 kh}{8 \sin h^4(kh)} \quad (\text{Eq. 13})$$

Onde  $h$  é a profundidade no ponto do domínio.

As principais hipóteses e limitações do OLUCA – SP são:

- Fluido é não viscoso, incompressível e de densidade constante;
- Fluxo é irrotacional e estacionário;
- A pressão é constante na superfície livre, não se considerando a ação do evento e a ação de Coriolis;
- Fundo de declive suave (1:3), ou seja, assume que as variações no fundo ocorrem sobre distâncias maiores em comparação com o comprimento da onda;
- Devem ser evitadas grandes variações de profundidade no eixo  $y$ , já que a ondulação entra na malha apenas por este eixo, assumindo ondulação igual em todos os pontos de contorno da entrada.
- O modelo requer uma determinada resolução espacial de comprimento de onda, o que limita as dimensões da malha;
- A propagação principal de ondas é na direção  $x$  e o giro máximo é de  $\pm 50^\circ$ , tanto na entrada da malha quanto na chegada da área de estudo;
- Considera os fenômenos de refração, difração, empinamento e quebra de ondas, mas não se considera o efeito da reflexão destas;
- Pode ocorrer instabilidade para ondas próximas aos contornos das malhas e que encontram uma batimetria que não decresce, dessa forma os contornos das malhas devem estar longe da zona de estudo.

### 3.6.2. Modelo de correntes por quebra em praias (COPLA)

O modelo de correntes COPLA é um modelo numérico que resolve as equações de fluxo dentro da zona de quebra das ondas utilizando como parâmetros de entrada os resultados de campos de ondas do modelo OLUCA. Ele resolve de forma integrada na profundidade a equação de conservação da massa e do movimento em duas dimensões horizontais (2DH).

O COPLA determina o tensor de radiação de onda a partir dos resultados obtidos de altura e direção da propagação de onda, calculando o campo de correntes e níveis em ditos tensores de radiação por meio de

um modelo não linear que resolve as equações integradas de Navier – Stokes.

Ele é baseado nas seguintes hipóteses e limitações (MMA, no prelo (f)):

- Fluido homogêneo, incompressível e com densidade constante;
- A pressão é constante na superfície livre
- Assume-se uma condição de reflexão total nas linhas de costas de praias e costões;
- Variação de profundidade suave, de forma que a velocidade da corrente ( $u, v$ ) seja independente desta;
- Cada trem de ondas incidente cria seu próprio sistema circulatório de correntes;
- O movimento oscilatório é irrotacional;
- Flutuações turbulentas por causa das ondas são desprezíveis;
- Não se considera Coriolis;
- As correntes são suficientemente fracas para ser considerada sua interação com o trem de ondas.

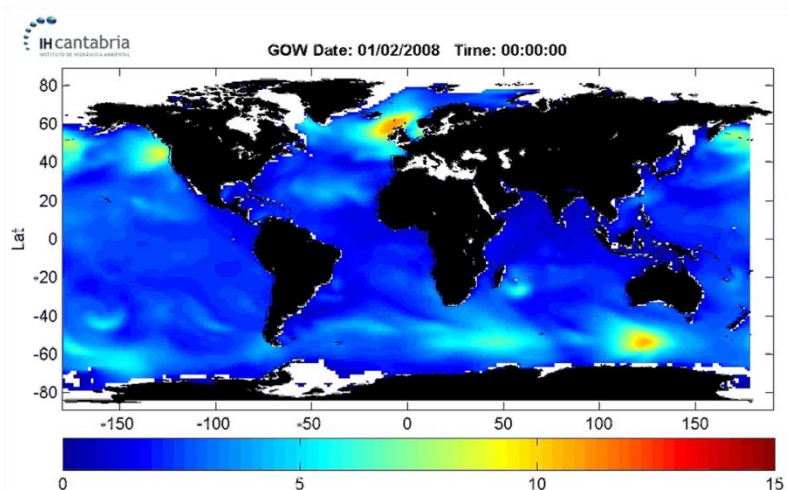
### **3.6.3. Base de dados SMC – Brasil**

O modelo SMC – Brasil possui uma base de dados de ondas de reanálise com resolução temporal horária de estados de mar de 60 anos de toda a costa brasileira. Dados calibrados e validados para serem aplicados em estudos da dinâmica costeira do Brasil.

#### **3.6.3.1. Base de dados de ondas**

A base de dados de ondas em águas profundas (*Global Ocean Waves*, GOW) se obteve a partir de reanálises globais durante um período de 60 anos, 1948 a 2008, utilizando o modelo WWIII (*Wave Watch III*), versão 2.2 (TOLMAN, 2002). As simulações foram forçadas com reanálise atmosférica NCEP/NCAR (*National Center for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research*) que incluiu a variabilidade de ventos globais e de cobertura de gelo. Foi utilizada a batimetria global GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Oceans*), construída baseando-se na combinação de dados procedentes de sondas de barcos e satélites. Os resultados da reanálise foram séries espectrais de 60 anos com estados de mar a um intervalo de uma hora. Os parâmetros obtidos foram  $H_s$ ,  $T_m$ ,  $T_p$ ,  $\theta_p$ ,  $\theta$ , dispersão direcional e os espectros direcionais. A base de dados GOW foi calibrada e validada

através de dados de altimetria de satélites das missões Jason 1, Jason 2, TOPEX, ERS-2, Envisat e GFO e também validada com dados de 21 boias espalhadas em águas profundas nos oceanos Atlântico, Pacífico e no mar do Caribe (Figura 11) (REGUERO *et al.*, 2012; MMA, no prelo (a)).



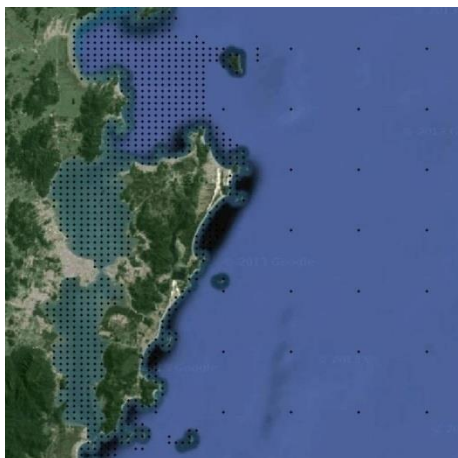
**Figura 11 - Exemplo dos resultados de altura significativa obtidos a partir da reanálise global de Hs (MMA, no prelo (a)). Resultados em m.**

Os dados GOW têm características globais, dessa forma não são adequados para estudos nas zonas costeiras do Brasil. Com o objetivo de aproximar esses dados de onda até a costa foi então realizado um *downscaling* para proporcionar características regionais a esta base de dados.

A transferência de dinâmica em águas intermediárias (*Downscaled Ocean Waves*, DOW) foi realizada através de simulações executadas com o modelo numérico SWAN (BOOIJ; HOTHUIJSEN, 1999). Para tal foi utilizada a batimetria das cartas náuticas brasileiras, no intuito de melhorar a resolução da batimetria anterior GEBCO. Os dados DOW foram calibrados e validados com os mesmos dados de altimetria dos dados GOW e também foram validados com dados da boia da UFRGS localizada em Tramandaí, RS (CAMUS *et al.*, 2011; CAMUS *et al.*, 2013; MMA, no prelo (a)). Em 2015, Gomes da Silva *et al.* utilizando dados obtidos de uma boia *Waverider*, localizada a 35km da Ilha de Santa Catarina também apresentaram a validação dos

parâmetros de  $H_s$  e  $T_p$  do SMC – Brasil, onde os dados  $H_s$  foram bem ajustados, porém os dados  $T_p$  foram subestimados.

A base de dados DOW com parâmetros de  $H_s$ ,  $T_m$ ,  $T_p$ ,  $\theta$  se encontra disponível no SMC (Figura 12) para a realização da propagação final de ondas até a costa utilizando o modelo numérico OLUCA.



**Figura 12-** Base de dados DOW (em preto) no entorno da Ilha de Santa Catarina.

### **3.6.3.2. Base de dados de nível**

O SMC – Brasil também possui uma base de dados de nível do mar. As bases de dados de maré astronômica e maré meteorológica possuem duração de 60 anos (1948 – 2008) a um intervalo de tempo de 1 hora, sendo que a base dados de maré astronômica possui 125 séries temporais enquanto que a base de dados de maré meteorológica 24 séries.

#### **MARÉ ASTRONÔMICA**

Consistindo de dados de elevação do nível do mar resultantes das forças de atração do sistema Terra – Lua – Sol, a base de dados de maré astronômica (*Global Ocean Tides*, GOT) do SMC – Brasil foi criada a partir da seleção de uma série de pontos ao longo da costa brasileira com uma resolução de 50 km (Figura 13), obtenção das constantes harmônicas desses pontos através do modelo global de marés TPXO

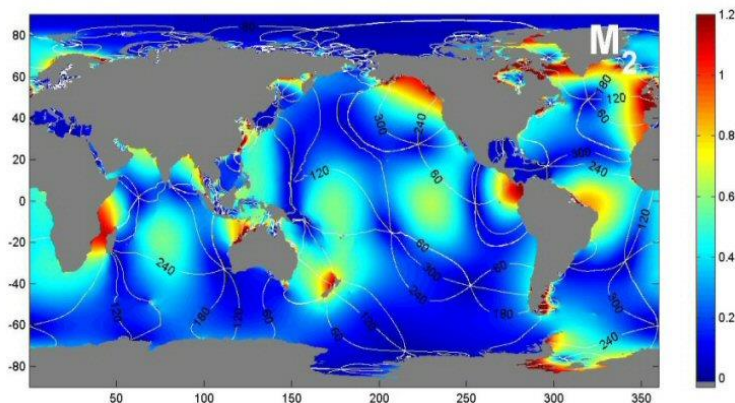
(EGBERT *et al.*, 1994) e por fim predição das séries de maré astronômica por meio da ferramenta RomsTools (PENVEN *et al.*, 2007) e do modelo de análises harmônicas *t\_tide* (PAWLOWICZ *et al.*, 2002) (MMA, no prelo (h)).



**Figura 13 - Pontos selecionados para a geração da base de dados de maré astronômica do SMC – Brasil (MMA, no prelo (h)).**

A base GOT inclui oito constantes harmônicas ( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $P_1$  e  $Q_1$ ) e duas componentes de longo prazo ( $M_f$  e  $M_m$ ) (Figura 14) e foi validada com dados de marégrafos da Universidade do Havaí (UHSLC), do Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (INPH) e da Marinha do Brasil (MMA, no prelo (h)).



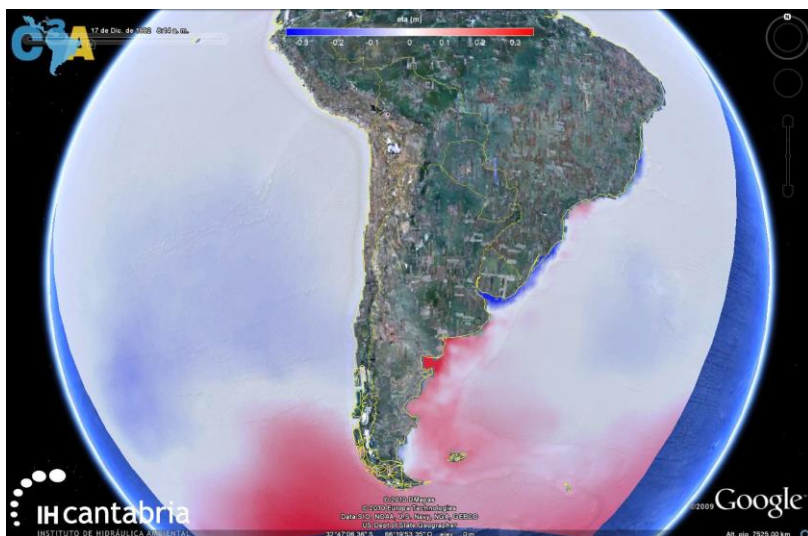


**Figura 14 - Mapa da componente de maré  $M_2$  calculado com o modelo TPXO (MMA, no prelo (h)).**

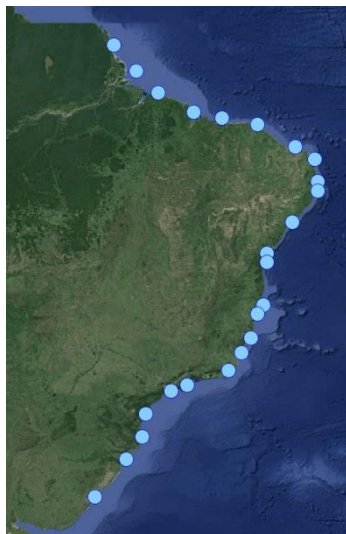
### MARÉ METEOROLÓGICA

A base de dados de maré meteorológica (*Global Ocean Surge, GOS*) é constituída de uma seleção de séries de reanálises regionais ao longo da costa brasileira simuladas numericamente com o modelo tridimensional de circulação ROMS (*Regional Ocean Modeling System*) (SHCHEPETKIN; MCWILLIAMS, 2005), que consiste de dados de variação do nível do mar decorrente de fatores atmosféricos (Figura 15) (MMA, no prelo (h)).

Conta com 24 pontos de dados ao longo do litoral brasileiro separados a uma distância média de 100km de série de dados com resolução temporal horária (Figura 16). A base GOS foi validada com os dados dos marégrafos UHSLC. Os marégrafos do INPH e da Marinha do Brasil não puderam ser utilizados por possuírem no máximo um ano de registro de dados (MMA, no prelo (h)).



**Figura 15 - Resultados da reanálise GOS de elevação da superfície livre da maré meteorológica no dia 17/12/1992, 6:15, América do Sul (MMA, no preto (h)). Resultado em m.**



**Figura 16 - Pontos seleccionados para a geração da base de dados de maré meteorológica do SMC – Brasil (MMA, no preto (h)).**

### 3.6.3.3. Batimetria

O SMC – Brasil possui ainda uma base de dados batimétrica. Esta batimetria é originada da digitalização das cartas náuticas do litoral brasileiro provenientes da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). Possui também arquivos de dados obtidos por pesquisas de navios fornecidas por instituições como: Bampetro, Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), Universidade de São Paulo (USP) e Marinha do Brasil. Além disso, há dados batimétricos do GEBCO.

## 3.7. SÍNTESE: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A partir da fundamentação teórica, algumas conclusões gerais podem ser registradas:

- Ondas são manifestações de força, como o vento, que transportam energia através do fluido e que ao chegar em águas rasas são afetadas por fenômenos como a reflexão, difração, refração e empinamento, que alteram suas propriedades (altura, período, direção).
- Recentemente a variabilidade histórica do clima de ondas tem sido intensamente estudada por diferentes autores, os quais demonstraram que existe uma tendência de aumento na altura, período e uma mudança de direção destas. Demonstraram também que existe relação entre as ondas e diferentes índices climáticos.
- No sul do Brasil o Índice de Oscilação Sul, o Índice de Oscilação Decadal do Pacífico e o Índice de Oscilação Antártica são os índices mais comumente estudados por causa da sua maior influência nessa área.
- A morfodinâmica de praias é o ajuste mútuo entre a topografia e a dinâmica do fluido envolvendo o transporte de sedimento, onde o tempo de resposta e a herança geológica são de fundamental importância para o processo.
- O transporte de sedimentos ocorre quando forças que estabilizam o grão em repouso são excedidas por forças desestabilizadoras geradas pelo fluido em movimento. Ocorre tanto no fundo como em suspensão.
- O transporte longitudinal de sedimentos, também conhecido como deriva litoral, é dado em função do fluxo de energia das ondas incidentes e das características da praia. É um dos

principais processos costeiros de controle da variação da morfologia praial, determinando a propensão à erosão, acresção ou a estabilização da linha de costa.

- A correta determinação do transporte longitudinal é o que condiciona a evolução temporal da praia. Por ser difícil de mensurar, o transporte de sedimentos também costuma ser estimado a partir de modelos numéricos. Mesmo assim ambos dão apenas uma estimativa de resultado pelo fato do transporte envolver diversos fatores ainda não completamente mensuráveis em campo ou por modelos.
- Praias de enseada são caracterizadas como sendo uma linha de costa arenosa limitada por afloramentos rochosos ou promontórios, naturais ou antrópicos, onde esta assume uma forma de meio coração. São encontradas em todas as latitudes e assumem a forma de equilíbrio em curva como consequência do balanço de fornecimento de sedimentos, da capacidade das ondas de redistribuir esse sedimento ao longo da costa e do tempo para que a linha de costa encontre o equilíbrio. Como em praias de enseadas o grau de exposição às ondas varia, esta pode assumir diferentes características morfodinâmicas em diferentes pontos.
- O perfil praial de equilíbrio é definido como a resultante do balanço entre forças construtivas e destrutivas que ocorrem em condições de ondas estacionárias, para um tipo de sedimento em particular. Assim, o perfil da praia depende da granulometria presente, enquanto que a onda afeta as mudanças na profundidade do perfil, pois responde a batimetria do local, mostrando assim que existe uma relação de equilíbrio entre a dinâmica marinha e a morfologia do perfil.
- A profundidade em que o perfil de equilíbrio não responde da mesma forma à ação das ondas é conhecida como profundidade de fechamento.
- A forma em planta de uma praia é governada principalmente pelas correntes induzidas pelas ondas, pela quantidade de sedimento existente, o tamanho de grão e os limites da praia.
- O equilíbrio da forma em planta pode ser estático, dinâmico ou instável com remodelamento natural. Nas praias de enseada em equilíbrio estático assume-se que a deriva litoral é inexistente, não necessitando de um aporte de sedimentos para manter a mesma estável. Praias de enseada em equilíbrio dinâmico necessitam de uma fonte de sedimentos para evitar erosão da

linha de costa, onde todo o aporte sedimentar que entra é posteriormente perdido com a dinâmica, mantendo-se assim o sistema estável. E praias com remodelamento natural são instáveis normalmente por ter ocorrido alguma alteração antrópica no ambiente, fazendo com que haja uma remodelação na forma da praia.

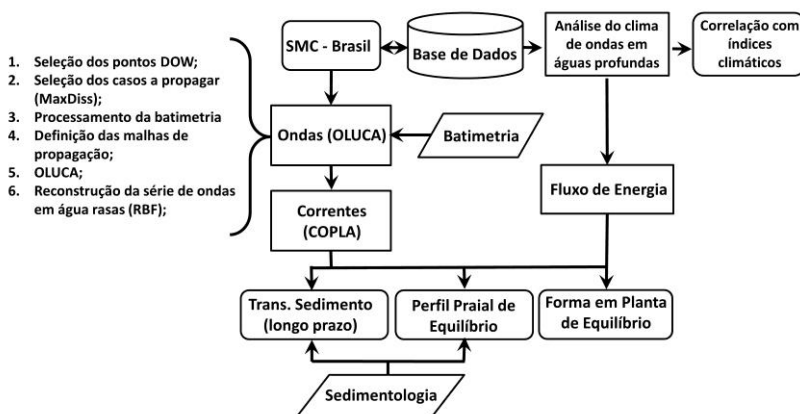
- A equação parabólica é a única equação que utiliza parâmetros da geometria da baía e da dinâmica, como o ponto de difração e a direção predominante do fluxo de energia de onda, sendo assim a que melhor descreve a estabilidade das praias de enseada.
- Modelos numéricos são *softwares* que utilizam equações matemáticas de forma a predizer o comportamento de determinado sistema. Um desses modelos é o SMC, o qual se constitui, entre outros, de diferentes ferramentas numéricas para o cálculo de propagação de ondas, correntes, transporte de sedimentos, estabilidade do perfil e da forma em planta praial.
- O modelo de propagação de ondas espectral de refração e difração é governado pela equação do declive suave, já o modelo de correntes que resolve as equações de fluxo dentro da zona de quebra das ondas se baseia na equação de Navier – Stokes.
- O modelo SMC – Brasil possui ainda uma base de dados de ondas de reanálise com resolução temporal horária de estados de mar de 60 anos de toda a costa brasileira. Dados calibrados e validados para serem aplicados em estudos da dinâmica costeira do Brasil. Assim como possui uma base de dados batimétrica originada da digitalização das cartas náuticas do litoral brasileiro.



## 4. METODOLOGIA

A metodologia aplicada neste trabalho consistiu em dois passos principais: i) Análise do clima de ondas em águas profundas; ii) Execução dos modelos de propagação de ondas, correntes geradas pela quebra, transporte de sedimentos, perfil de equilíbrio e forma em planta.

Com o objetivo de descrever o clima de ondas da região, primeiramente foi realizada uma análise estatística inicial dos dados de ondas em águas profundas. Posteriormente, para a realização dos objetivos seguintes, os modelos de cálculo de ondas e correntes do SMC foram executados em sequência (cada nova etapa realizada foi dependente do resultado da anterior), no intuito de obter os dados de entrada para as simulações do transporte de sedimentos, do cálculo da forma em planta e perfil praiar. Para tal, foram utilizados dados de batimetria, parâmetros de onda e sedimentologia da área de estudo. A metodologia adotada neste trabalho é apresentada de forma esquemática no fluxograma da Figura 17.



**Figura 17 - Etapas da metodologia seguida no trabalho.**

Os dados utilizados para que todas as etapas fossem completadas neste trabalho estão apresentados na Tabela 2:

**Tabela 2 - Dados utilizados no presente trabalho.**

<b>Dados</b>	<b>Fonte</b>	<b>Etapa do trabalho</b>
Sedimentologia	Projeto MMA-Riscos	Transporte de sedimentos e perfil de equilíbrio
Batimetria	DHN / Projeto MMA-Riscos	Propagação de ondas e correntes
Ondas	SMC – Brasil (reanálise)	Propagação de ondas e cálculo do fluxo de energia
Maré Astronômica	SMC – Brasil (reanálise)	Propagação de ondas
Maré Meteorológica	SMC Brasil (reanálise)	Propagação de ondas

Os detalhes de cada uma das etapas básicas do trabalho (análise do clima de ondas em águas profundas e execução dos modelos) estão apresentados nos itens a seguir.

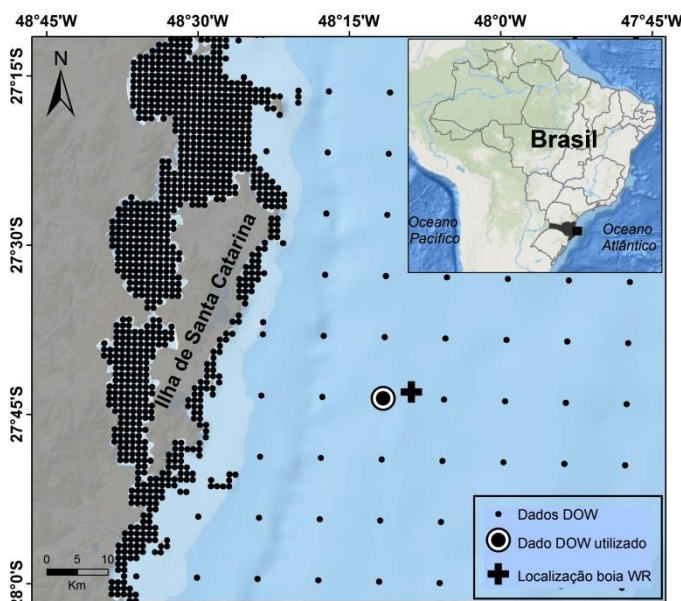
#### 4.1. ANÁLISE DA VARIABILIDADE DO CLIMA DE ONDAS EM ÁGUAS PROFUNDAS

Para a realização dos objetivos propostos neste trabalho é necessário dispor de dados de parâmetros de ondas, no entanto, não estão disponíveis hoje, séries longas de dados medidos próximo à área a ser estudada. Neste caso, o mais conveniente é a utilização de dados derivados de modelos de ondas globais e altimetria de satélite, mais especificamente bases de dados de onda de reanálises (REGUERO *et al.*, 2012). A principal vantagem na utilização de dados de reanálise está na possibilidade de se trabalhar com dados distribuídos homogeneamente no espaço e no tempo. Alguns autores indicam diferenças quando dados de reanálise são comparados com dados medidos (CAIRES; STERL, 2005; MÍNGUEZ *et al.* 2011, 2012; GOMES DA SILVA *et al.*, 2015), ainda assim tais bases de dados podem ser de grande importância em zonas onde dados medidos não estão disponíveis, como é o caso deste trabalho, desde que cuidadosamente aplicados.

Assim, a base de dados de reanálise utilizada neste estudo foi a base DOW (ver item 3.6.3.1), com 60 anos de dados de ondas (1948 – 2008). Optou-se por utilizar os dados de ondas de um ponto previamente validado. Por isso, o ponto DOW utilizado para caracterização do clima de ondas em águas profundas foi o mesmo escolhido por GOMES DA SILVA (2014) e GOMES DA SILVA *et al.* (2015) para validação da



base de dados de reanálise. Em tais trabalhos, os autores compararam dados da série DOW com dados medidos pela boia *Waverider Datawell II* (WR), fundeada pelo Laboratório de Hidráulica Marítima da Universidade Federal de Santa Catarina (LaHiMar – UFSC) entre os anos de 2001 à 2005 a 35 km da costa da Ilha de Santa Catarina (Figura 18). O período analisado compreendeu os meses de maio, junho, julho, outubro, novembro e dezembro de 2004 e o período de janeiro a maio de 2005, dados que estão disponíveis em [www.ndbc.noaa.gov](http://www.ndbc.noaa.gov) e [cdip.ucsd.edu](http://cdip.ucsd.edu).



**Figura 18 - Ponto da base de dados DOW (27°42'55"S, 48°10'50,16"O) utilizado na análise do clima de ondas em águas profundas e posição da boia WR 27°42'18"S, 48°8'2,4"O). Profundidade do ponto: 75 m. Profundidade da boia: 80 m. Pontos pretos representam todos os dados DOW disponíveis para essa área.**

A caracterização do clima de ondas em águas profundas se deu através de diversas análises estatísticas. Para o cálculo das estatísticas descritivas básicas, assim como para a geração dos gráficos das séries temporais, histogramas, densidade de probabilidade, rosas direcionais, cálculo dos eventos extremos e do fluxo de energia utilizou-se a ferramenta computacional Matlab®.

As análises do clima de ondas se deram de duas formas: (1) valores médios temporais (anuais e sazonais) e; (2) valores de eventos extremos ( $H_{s12}$ ). As médias sazonais foram determinadas através da combinação de médias mensais individuais em Dez – Jan – Fev (DJF) para o verão, Mar – Abr – Maio (MAM) para o outono, Jun – Jul – Ago (JJA) para o inverno e Set – Out – Nov (SON) para a primavera.

Na intenção de explicar a variabilidade do clima de ondas, realizou-se ainda uma análise de correlação entre estes e dados de 5 índices atmosféricos. A análise de correlação consiste em determinar quão bem duas (ou mais) variáveis co-variam no tempo (ou espaço) (EMERY; THOMSON, 2001). O coeficiente de correlação linear sugere uma dependência linear dos dados comparados ao indicar o grau de dispersão em torno da função de ajuste (regressão linear), podendo variar entre 1 e -1, onde valores próximos a zero indicam baixa correlação entre as variáveis. Valores positivos indicam um comportamento similar entre as variáveis (correlação positiva) e valores negativos indicam uma relação inversa entre estes (correlação negativa).

A correlação foi então realizada entre os dados de clima de ondas ( $H_s$ ,  $H_{s12}$ ,  $T_p$ , FE e FE direcional) e os índices climáticos: Antarctic Oscillation (AAO), Pacific Decadal Oscillation (PDO), Southern Oscillation Index (SOI), Multivariate Enso Index (MEI) e Oceanic Niño Index (ONI), por serem índices comumente estudados no sul do Brasil. Os índices cobrem o período de 58 anos (1950 – 2008) com exceção do índice Antarctic Oscillation (AAO) que inicia em 1979 (30 anos).

Os dados dos índices climáticos utilizados neste trabalho encontram-se em:

AAO: [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily\\_ao\\_index/ao/ao\\_index.html](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao/ao_index.html)

MEI: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/table.html>

ONI: [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml)

PDO: <http://research.jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>

SOI: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/soi/>

## 4.2. EXECUÇÃO DOS MODELOS

Para a propagação de ondas e cálculo de correntes, foram utilizados os modelos OLUCA – SP e COPLA, inseridos no SMC. Estes modelos trabalham de forma interligada e sequencial, onde os dados de saída de um modelo são utilizados como dados de entrada para o modelo seguinte. Dessa forma, necessitou-se propagar os dados de ondas DOW já disponíveis no SMC Tools até águas rasas. O modelo OLUCA representa bem o processo da difração, sendo este um processo bastante influente no comportamento das ondas na área de estudo devido a presença das Ilhas que compõem a Reserva Biológica Marinha do Arvoredo ao norte e dos promontórios da Ponta da Feiticeira a noroeste e da Ponta dos Ingleses a sudeste da praia dos Ingleses, e a presença da Ilha das Aranhas e do promontório da Ponta das Aranhas ao norte e do promontório da Ponta da Galheta ao sul do arco praial Barra da Lagoa - Moçambique. Posteriormente os parâmetros de ondas gerados pela execução do modelo OLUCA foram utilizados no cálculo dos tensores de radiação, direção e magnitude das correntes pelo modelo COPLA. Os resultados destes dois modelos são utilizados nas análises de longo prazo do transporte de sedimentos e da estabilidade em perfil e em planta. As etapas da modelagem estão descritas em detalhe no formulário apresentado no Apêndice A.

#### **4.2.1. Propagação dos dados de ondas**

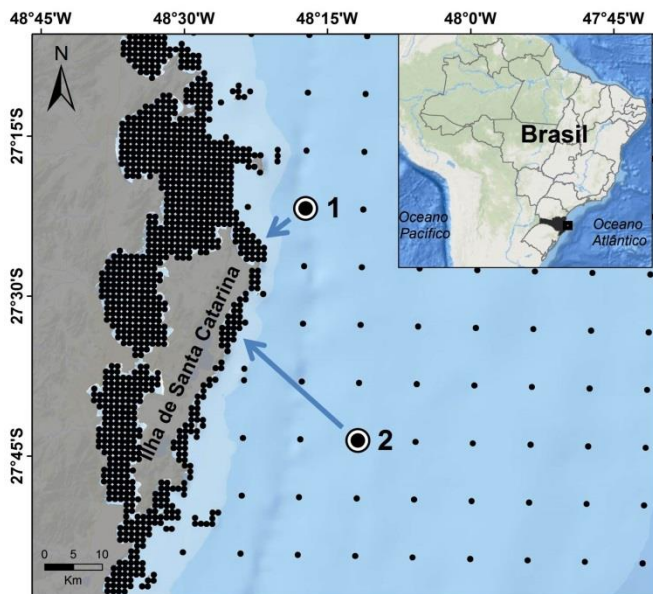
A propagação dos casos de ondas foi realizada com o modelo OLUCA SP. Tal modelo foi escolhido por representar bem os processos de difração e refração, processos importantes na transformação de ondas na área de estudo. O processo de propagação consistiu em seis etapas:

- Etapa 1: Seleção dos pontos DOW;
- Etapa 2: Seleção de casos (MaxDiss);
- Etapa 3: Processamento da batimetria;
- Etapa 4: Definição das malhas de propagação;
- Etapa 5: Propagação dos casos de ondas;
- Etapa 6: Reconstrução da série em águas rasas.

##### **Etapa 1: ESCOLHA DOS PONTOS DOW**

A partir da base DOW, dois pontos de dados foram selecionados para as propagações de águas profundas para águas rasas (Figura 19). O ponto 1 foi utilizado nas propagações até a praia de Ingleses. Já o ponto 2 (corresponde ao mesmo ponto utilizado na análise do clima de ondas

em águas profundas) foi utilizado nas propagações até as praias da Barra da Lagoa - Moçambique.



**Figura 19 – Pontos da base de dados DOW utilizados na propagação de ondas de águas profundas para águas rasas. A série do ponto 1 (Prof. 52 m) foi propagada até a praia de Ingleses e a série do ponto 2 (Prof. 75 m) até as praias de Moçambique e Barra da Lagoa. Pontos pretos representam todos os dados DOW disponíveis para essa área.**

### Etapa 2: SELEÇÃO DE CASOS (MAXDISS)

Uma série temporal de 60 anos de parâmetros de ondas com dados horários corresponde a mais de 500.000 dados de estados de mar diferentes ( $H_s$ ,  $T_p$  e  $\theta$ ). Propagar toda esta série implicaria em alto custo computacional e muito tempo para finalizar as propagações. Por essa razão, em muitos estudos de propagação de ondas utilizam-se métodos de seleção de casos, onde casos representativos de toda a série são selecionados e propagados. Posteriormente, através de técnicas de interpolação, a série total de dados é reconstruída nos pontos de interesse em águas rasas.

Dentro do programa SMC – Brasil a seleção dos casos de clima de ondas a serem propagados se realiza através da técnica de seleção da Máxima Dissimilaridade (MaxDiss).

A técnica da Máxima Dissimilaridade (MaxDiss) tem como objetivo a seleção dos pontos dentro da série que sejam mais dissimilares (diferentes) entre si, desta forma se garante que os casos selecionados sejam representativos de todas as condições de estados de mar da série de reanálise (CAMUS *et al.*, 2011). Inicialmente, os parâmetros de ondas são padronizados para que estes recebam o mesmo peso no critério de similaridade. O cálculo inicia com a seleção de um caso extremo e continua com a verificação da máxima dissimilaridade com o caso seguinte, não mais participando da seleção um caso anteriormente selecionado. A seleção dos casos termina quando o algoritmo atinge o número de iterações determinado nas configurações do código (M – valor determinado pelo usuário). O cálculo da dissimilaridade se dá através do método da distância Euclidiana (Eq. 14), onde primeiro se calcula a distância do dado inicial com todos os elementos do subconjunto R e depois se elege qual o dado de maior distância (CAMUS, 2009).

$$d_{ij} = \|X_i - v_j\|; i = 1, \dots, N - R; j = 1, \dots, R \text{ (Eq. 14)}$$

Onde:

$d_{ij}$  é a distância entre o dado inicial (N) e o subconjunto R ( $R \leq M$ )

$X_i$  é o parâmetro do caso analisado

$v_j$  representa a diversidade do dado

Por fim os dados são transformados para voltarem a sua configuração inicial.

Camus (2009) concluiu que quanto maior o número de casos selecionados mais representativa é a seleção e mais consistente é a reconstrução da série em águas rasas. No entanto, ao realizar testes com diferentes tamanhos de subamostras, a autora constatou que acima de 100 casos selecionados, os erros referentes à seleção passam a ser pouco representativos.

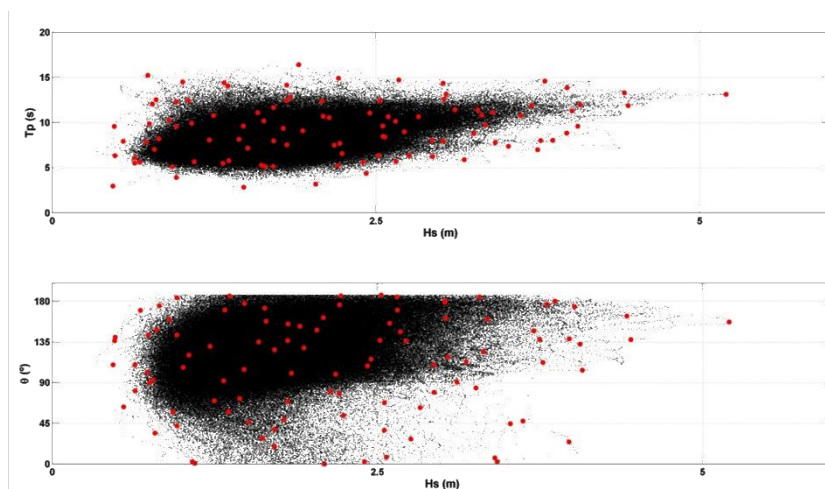
Desta forma a partir do ponto de dados DOW escolhido, foram selecionados 100 casos entre as direções de 0 à 180°, direções de ondas reais que efetivamente chegam a praia da Barra da Lagoa – Moçambique, e 0 à 135°, direções de ondas reais que efetivamente chegam a praia dos Ingleses (Tabela 3) para dois níveis de mar diferentes (baixamar e preamar). Tais ângulos representam os casos com direções possíveis de se propagar com o modelo OLUCA nas praias da

área de estudo, rejeitando casos com direções provenientes do continente e direções de ondas que não chegam a atingir as praias.

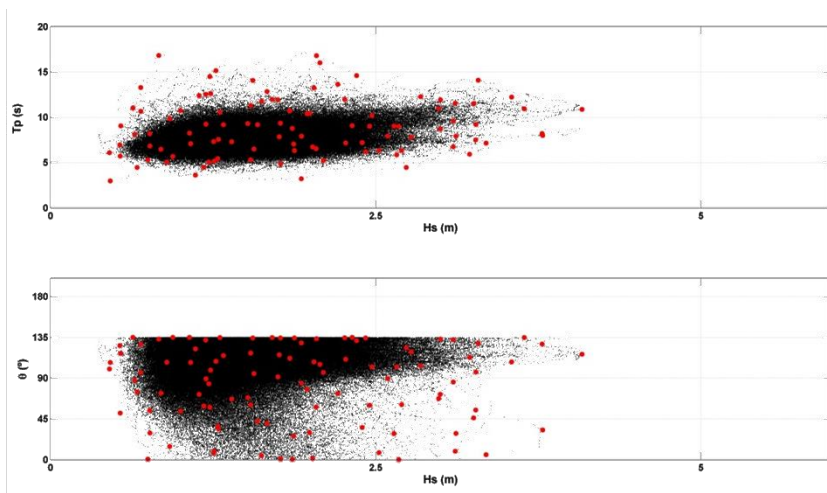
**Tabela 3 – Condições de redução das séries em águas profundas para casos possíveis de se propagar com o modelo OLUCA.**

Ponto	Condição para redução da série	Número de casos
(1) Ingleses	$0^\circ < \text{dir} < 135^\circ$	366266
(2) Barra da Lagoa - Moçambique	$0^\circ < \text{dir} < 180^\circ$	524067

Os resultados das seleções estão apresentados nas Figuras 20 e 21.



**Figura 20 - Casos selecionados para propagação até a praia da Barra da Lagoa - Moçambique. Em preto os dados da série reduzida, em vermelho os casos selecionados.**



**Figura 21 - Casos selecionados para propagação até a praia dos Ingleses. Em preto os dados da série reduzida, em vermelho os casos selecionados.**

### Etapa 3: PROCESSAMENTO DA BATIMETRIA

Para a propagação de ondas foram necessários dados de batimetria que representasse o fundo de forma mais real possível ao longo do domínio modelado. Os dados batimétricos utilizados neste trabalho são provenientes de duas fontes: (1) cartas náuticas 1902 e 1903 da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil digitalizadas dentro do *software* SMC - Brasil 3.0 e; (2) dados de batimetria de detalhe extraídos de um sonar de varredura lateral.

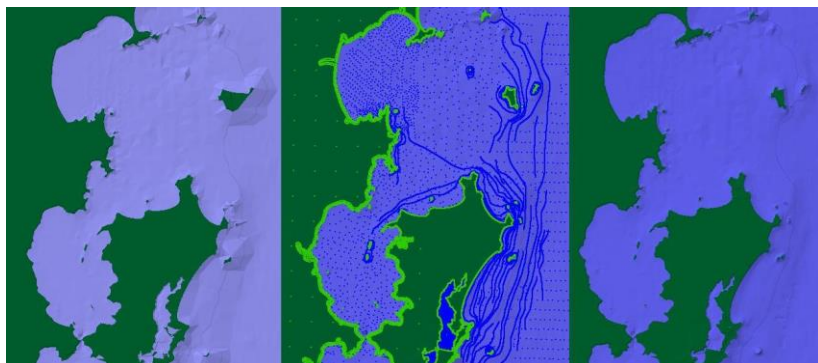
Esses dados foram utilizados na propagação de ondas, correntes, transporte de sedimentos, cálculo do perfil praiar e da forma em planta.

#### ***Processamento da batimetria da DHN – Fase 1***

As cartas náuticas da DHN são bastante utilizadas em casos de modelagem numérica, no entanto em muitas zonas se tratam de dados com pouco detalhe Assim sendo é necessário o processamento da batimetria.

O processamento da batimetria foi realizado através da inserção de cerca de 250 polígonos com valores de profundidade na área de estudo, suavizando assim locais com mudanças bruscas na batimetria (Figura 22). Esses polígonos representam isolinhas de profundidade (isobatimétricas) e são baseados nos valores pontuais das cartas náuticas. O objetivo do processamento é ajustar a batimetria de maneira

que ao interpolar os valores, a variação de profundidade esteja de acordo às limitações da Equação da Pendente Suave (equação que rege o modelo OLUCA). A eficiência do processamento foi verificada a cada alteração, executando o modelo com casos teóricos e verificando a estabilidade do mesmo.



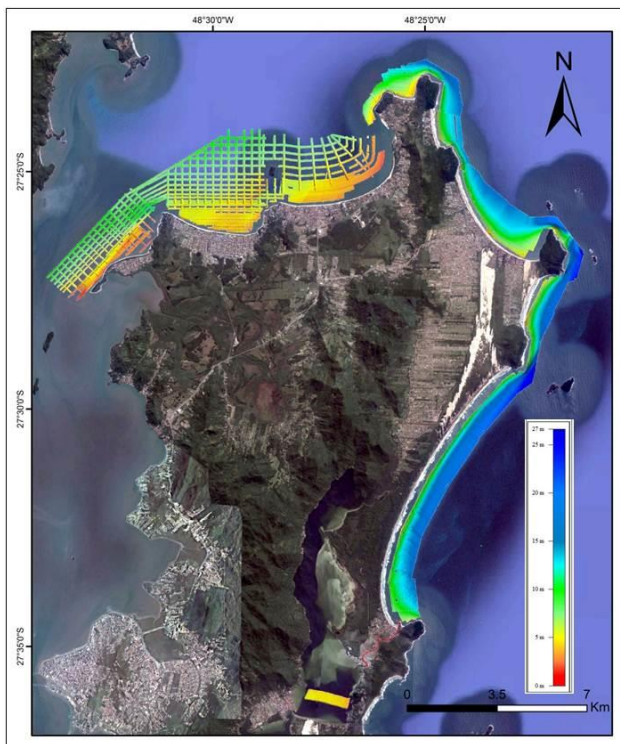
**Figura 22 - Passos do processamento da batimetria. Da esquerda para a direita: Batimetria inicial com dados de cartas náuticas; Polígonos isobatimétricos e; Batimetria final suavizada.**

### ***Batimetria de detalhe – Fase 2***

Um dos objetivos do projeto “Metodologia para quantificação de riscos costeiros e projeção de linhas de costa futuras como subsídio para estudos de adaptação da zonas costeiras do litoral norte da Ilha de Santa Catarina e regiões de entorno (MMA-Riscos)” desenvolvido no Laboratório de Oceanografia Costeira foi a realização de levantamentos batimétricos nas praias da região norte da Ilha de Santa Catarina e continente. Tais dados foram disponibilizados para a utilização no presente estudo.

A aquisição dos dados foi realizada utilizando um interferômetro EdgeTech® 4600, de 540 KHz de frequência, durante os anos de 2013 e 2014, num total de 865 km de linhas batimétricas cobrindo toda a região norte da ilha de Santa Catarina até profundidades maiores que a profundidade de fechamento. A área da sondagem está representada na Figura 23.

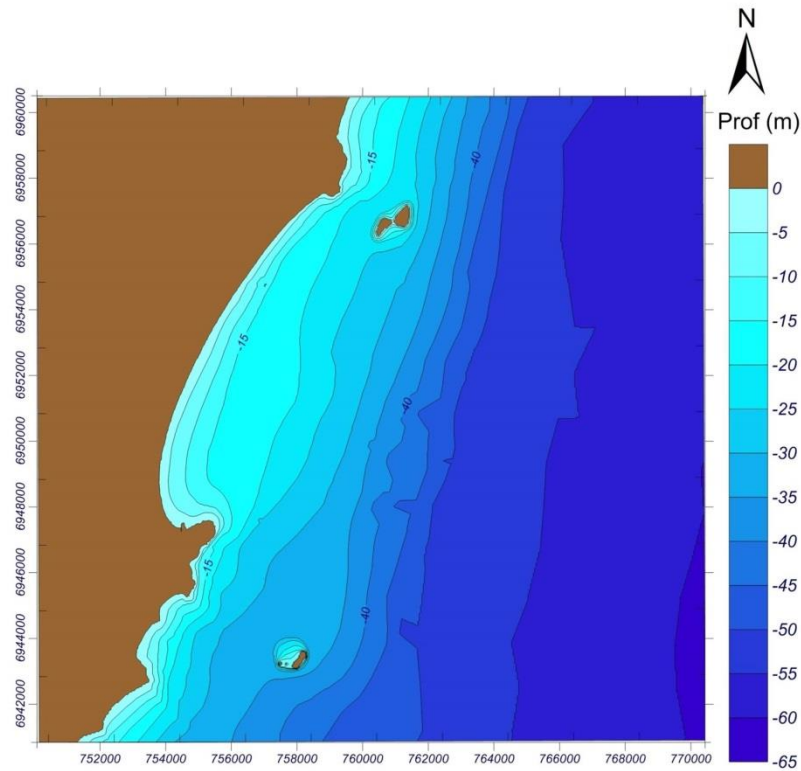




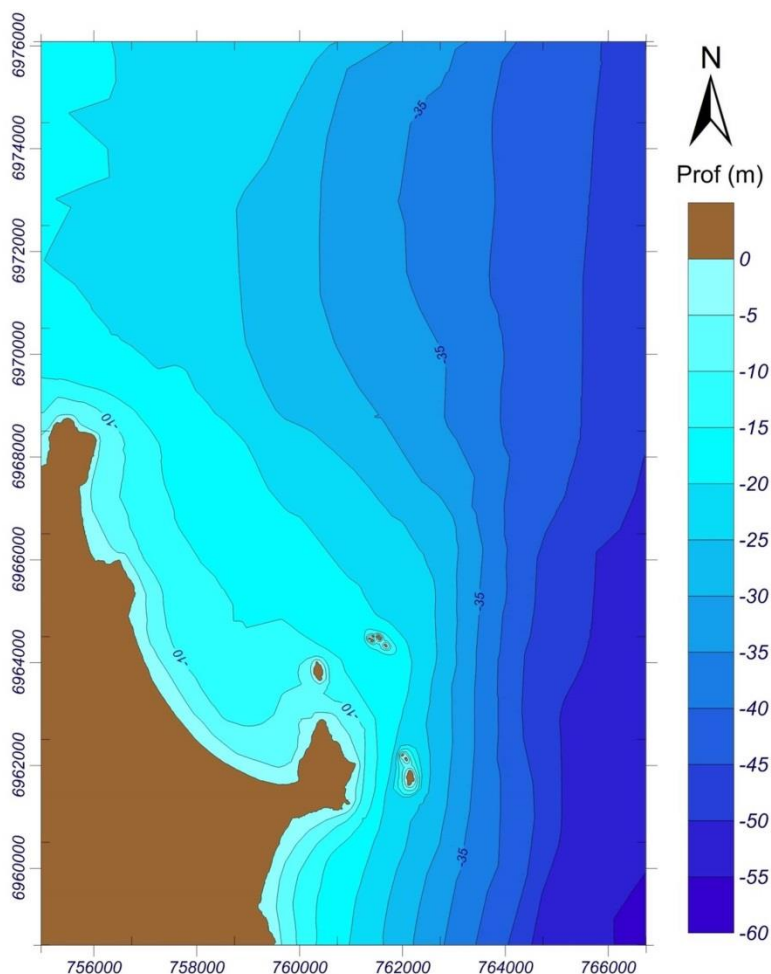
**Figura 23 – Localização dos levantamentos sonográficos na Ilha de Santa Catarina realizados pelo projeto MMA-Riscos. Fonte: Klein *et al.* (2016).**

Os dados batimétricos, tanto da DHN quanto da batimetria de detalhe, encontram-se referenciados ao datum vertical da DHN e datum horizontal WGS84.

A partir da batimetria da DHN processada e da inserção da batimetria de detalhe na área de estudo, o fundo marinho em frente as praias da Barra da Lagoa – Moçambique e Ingleses pôde ser representado da forma mais real possível. Nas Figuras 24 e 25 estão apresentadas as batimetrias finais da área de estudo.



**Figura 24 - Batimetria processada: Praia da Barra da Lagoa - Moçambique.**



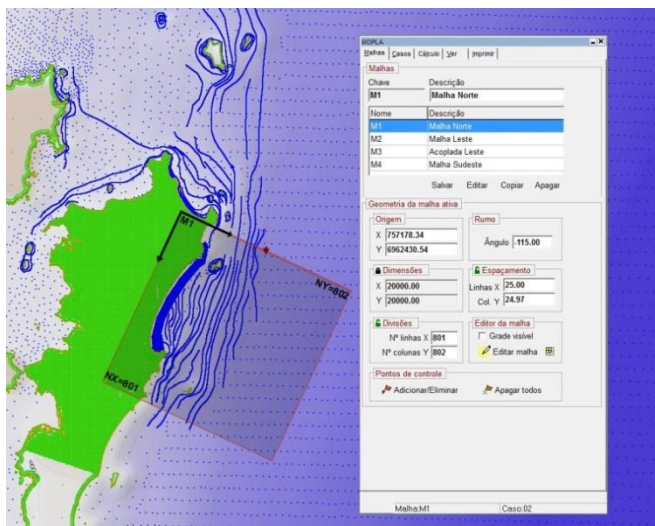
**Figura 25 - Batimetria processada: Praia dos Ingleses.**

#### Etapa 4: DEFINIÇÃO DAS MALHAS DE PROPAGAÇÃO

As malhas de cálculo foram geradas tendo em consideração a limitação dos ângulos de propagação imposta pelo modelo parabólico do declive suave. De acordo com as premissas deste modelo, a direção máxima de propagação deve estar entre  $\pm 55^\circ$  com relação ao eixo X da malha (eixo correspondente à direção principal de propagação). Desta forma, neste tipo de modelo é necessário a utilização de distintas

malhas, de modo a permitir que todos os casos seleccionados (todas as direcções) fossem contemplados.

No total foram geradas 4 malhas de propagação para a praia dos Ingleses (2 aninhadas) e 4 malhas para a Barra da Lagoa – Moçambique (1 aninhada). A resolução, orientação e demais detalhes das malhas são apresentadas nas Figuras 26 à 30.



**Figura 26 - Malha 1 para propagação de casos com entrada de norte/nordeste nas praias Barra da Lagoa - Moçambique. Direção de entrada de casos principal: 25°N. No detalhe constam as principais informações da malha.**

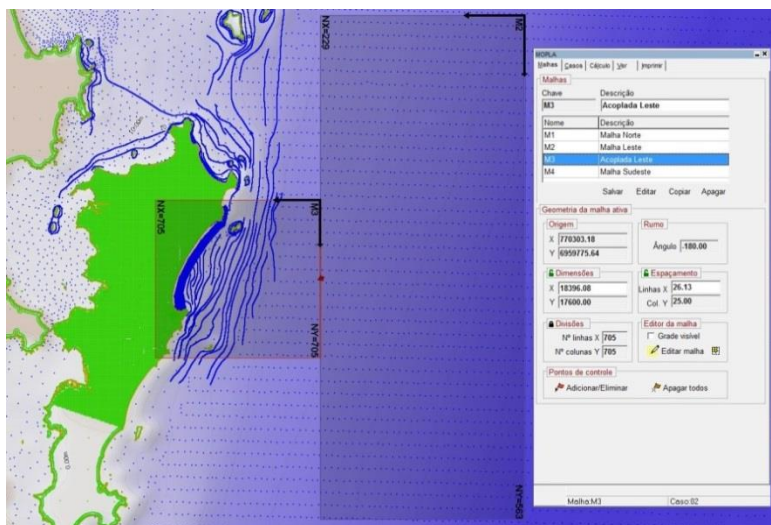


Figura 27 - Malha 2 e aninhada 3 para propagação de casos com entrada de leste nas praias Barra da Lagoa - Moçambique. Direção de entrada de casos principal: 90°N. No detalhe constam as principais informações da malha aninhada (de maior resolução). Espaçamento da malha externa = 100x100.

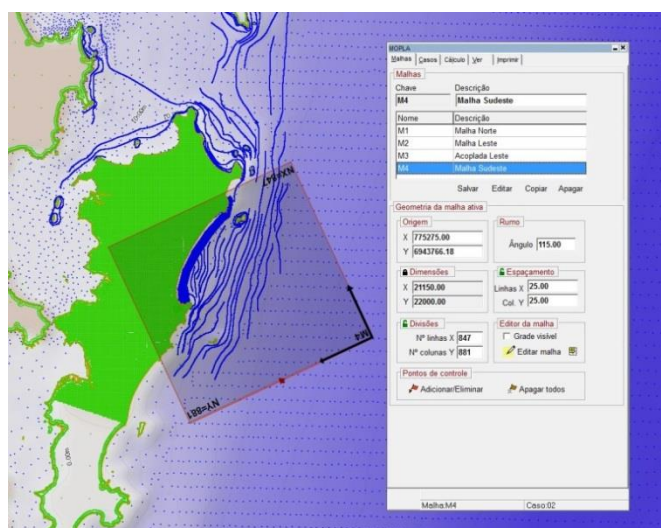
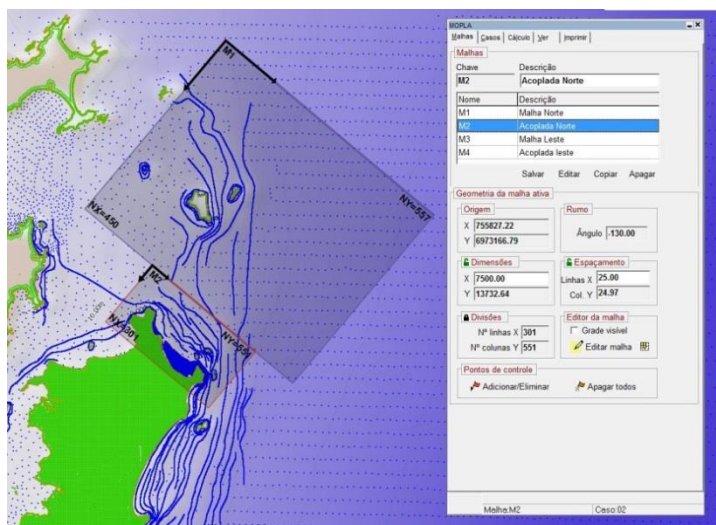
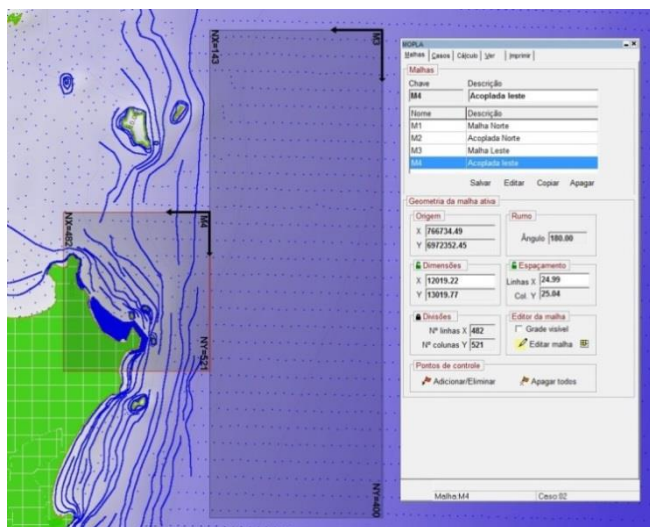


Figura 28 - Malha 4 para propagação de casos com entrada de sul/sudeste nas praias Barra da Lagoa - Moçambique. Direção de entrada de casos principal: 155°N. No detalhe constam as principais informações da malha.



**Figura 29 - Malha 1 e aninhada 2 para propagação de casos com entrada de norte/nordeste na praia dos Ingleses. Direção de entrada de casos principal: 40°N. No detalhe constam as principais informações da malha aninhada (de maior resolução). Espaçamento da malha externa = 100x100.**



**Figura 30 - Malha 3 e aninhada 4 para propagação de casos com entrada de leste/sudeste na praia dos Ingleses. Direção de entrada de casos principal: 90°N. No detalhe constam as principais informações da malha aninhada (de maior resolução). Espaçamento da malha externa = 100x100.**



Após a seleção dos casos e definição das malhas de propagação, é por fim, feito a propagação dos parâmetros de ondas até a costa, onde cada caso foi inserido na malha que apresentava a direção de propagação mais próxima à direção média do caso.

#### Etapas 5: PROPAGAÇÃO DAS ONDAS

A propagação de ondas de águas profundas para águas rasas foi executada utilizando o modelo OLUCA - SP, que faz parte do conjunto de modelos do SMC – Brasil. Este modelo foi escolhido por representar bem o comportamento das ondas na presença de promontórios e ilhas, bastante comuns na área de estudo deste trabalho.

Maiores detalhes das equações governantes do modelo podem ser encontradas no item 3.6.1.

#### Etapas 6: RECONSTRUÇÃO DA SÉRIE DE ONDAS EM ÁGUAS RASAS (RBF)

Após a propagação das ondas até águas rasas, realizou-se a reconstrução do clima marítimo. Esta etapa se dá através da interpolação dos casos selecionados e propagados. A técnica utilizada, neste caso, é a interpolação baseada em funções de bases radiais (RBF) gaussianas, muito utilizadas para dados com alta dimensionalidade e não distribuídos uniformemente (CAMUS *et al.*, 2011).

A técnica de interpolação RBF considera que a função de aproximação RBF é formada por uma combinação linear de funções radiais simétricas localizadas nos pontos de dados (Eq. 15). A série é reconstruída no ponto escolhido em águas rasas, em função dos casos selecionados e dos valores em águas profundas para cada parâmetro.

$$RBF(Z) = p(Z) + \sum_{j=1}^M a_j \phi(\|Z - Z_j\|) \quad (\text{Eq. 15})$$

Onde:

$RBF(Z)$  é a função de interpolação

$Z$  é o caso de onda em águas profundas

$p(Z)$  é uma função de base monomial

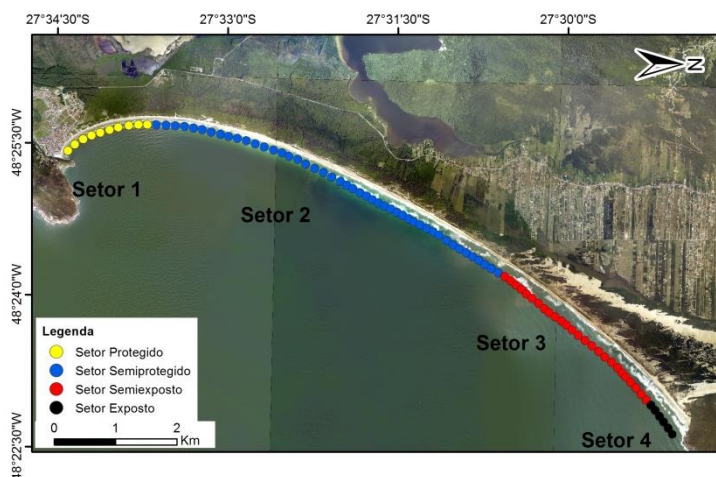
$a_j$  é o coeficiente da RBF

$\phi$  é a função de base radial para aquele parâmetro

$Z - Z_j$  é a distância euclidiana entre o parâmetro em águas profundas ( $Z$ ) e o mesmo em águas rasas ( $Z_j$ ) (CAMUS *et al.*, 2011).

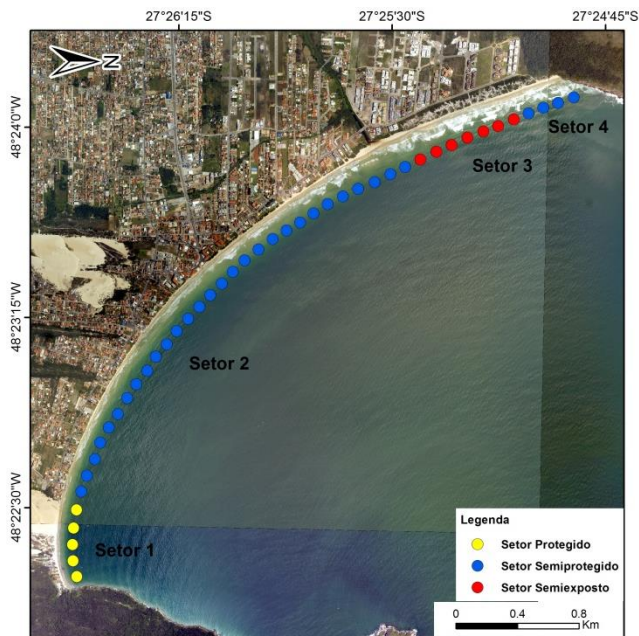
### 4.2.2. Setorização das praias

Os resultados das propagações foram, por fim, apresentados para os diferentes setores das praias estudadas. Em um trabalho anterior, Gomes da Silva (2014) apresentou a setorização das praias da Barra da Lagoa – Moçambique e Ingleses. Através da análise de agrupamento de parâmetros de onda ao longo de toda a praia, onde valores de  $H_s$  foram obtidos com base em casos propagados de diferentes direções, a autora dividiu as praias em quatro setores e os classificou de acordo ao grau de exposição às ondas. Esta mesma setorização é utilizada no presente estudo para apresentação dos resultados (Figuras 31 e 32).



**Figura 31 - Setorização das praias da Barra da Lagoa - Moçambique com base na análise de agrupamento de  $H_s$ . Fonte: Modificado de Gomes da Silva (2014).**





**Figura 32 - Setorização da praia dos Ingleses com base na análise de agrupamento de  $H_s$ . Fonte: Modificado de Gomes da Silva (2014).**

#### 4.2.3. Simulação das correntes

Para determinar o comportamento do sistema circulatório na área de estudo, este trabalho utilizou o modelo espectral de cálculo de correntes por quebra COPLA – SP.

Os parâmetros de entrada do modelo COPLA, para o cálculo dos tensores de radiação, direção e magnitude das correntes, foram os parâmetros de ondas gerados pela anterior execução do modelo OLUCA - SP. Ambos os resultados servem de base para a análise de longo prazo em praias.

Maiores detalhes do modelo podem ser encontrados no item 3.6.2.

#### 4.2.4. Análise de longo prazo em praias

O objetivo da análise de praias em longo prazo é determinar qual será a forma final (planta-perfil) de uma praia, além de conhecer a

evolução temporal desta em escala de anos através da análise das magnitudes dos processos estudados.

#### **4.2.4.1. Transporte de sedimentos**

Para o cálculo do transporte de sedimentos, inicialmente a série propagada de ondas foi reconstruídas em águas rasas. Assim, a partir desses pontos reconstruídos foram criados perfis até a praia para que as características das ondas na zona de arrebentação fossem determinadas.

O SMC - Brasil incorpora uma ferramenta que permite calcular o transporte potencial em longo prazo. Esta ferramenta avalia o transporte potencial a partir da formulação do CERC (USACE, 2002b) sobre um perfil de praia. Usando a formulação do CERC, pode-se estimar, a partir do período, altura de quebra e a variação do ângulo de incidência da onda, a variação da taxa de transporte de sedimentos na praia.

Maiores detalhes da equação do CERC podem ser encontradas no item 3.3.1.1.

#### **4.2.4.2. Perfil de equilíbrio**

Para a análise do perfil praial é necessário primeiramente conhecer a profundidade de fechamento da praia. Assim como no transporte de sedimentos, para o cálculo da profundidade de fechamento, e para o cálculo do perfil de equilíbrio, dividiu-se a enseada nos mesmos 4 setores onde primeiramente se determinaram os valores de  $H_{s12}$  e  $\sigma$  associado a  $H_s$  predominantes em cada setor da praia. Para o cálculo da profundidade de fechamento foi utilizada a fórmula de Hallermeier (1981).

No SMC - Brasil se aplica a equação do perfil de equilíbrio proposta por Bruun (1954) e Dean (1977), onde se assume que o perfil de praia é parabólico. Maiores detalhes dessas equações podem ser encontradas no item 3.5.1.

#### **4.2.4.3. Forma em planta**

O modelo SMC - Brasil possui uma ferramenta que permite calcular a direção do fluxo médio de energia em um ponto ou em um perfil dado e assim avaliar a posição da forma em planta de uma praia. O modelo utilizado no cálculo do fluxo de energia é descrito por USACE (2002a) e o

modelo de forma em planta utilizado no SMC - Brasil é a equação parabólica de Hsu e Evans (1989) modificada por González e Medina (2001). Maiores detalhes dessas equações podem ser encontradas nos itens 3.1.1 e 3.5.2.1, respectivamente.

#### 4.2.5. Sedimentologia

Para o cálculo do transporte longitudinal de sedimentos foram utilizados dados medianos de tamanho de grão, já para o cálculo do perfil de equilíbrio da praia foram utilizados dados médios de tamanho de grão (Tabela 4). Em 2013 foram realizadas campanhas de coletas de sedimentos a cada 200m em toda a enseada das praias da Barra da Lagoa - Moçambique e Ingleses pelo projeto MMA-Riscos. Foram coletadas e processadas amostras da face da praia, as quais foram disponibilizadas para utilização no presente estudo.

**Tabela 4 - Tamanho de grão para os 4 setores das praias Barra da Lagoa - Moçambique e Ingleses. Valores em mm.**

Praia	Setor	Tamanho médio de grão	Tamanho mediano de grão	Desvio padrão médio do grão
Ingleses	1	0,22	0,21	0,09
	2	0,26	0,24	0,11
	3	0,27	0,25	0,10
	4	0,25	0,23	0,10
Barra da Lagoa - Moçambique	1	0,23	0,21	0,09
	2	0,29	0,26	0,14
	3	0,41	0,35	0,22
	4	0,28	0,25	0,12

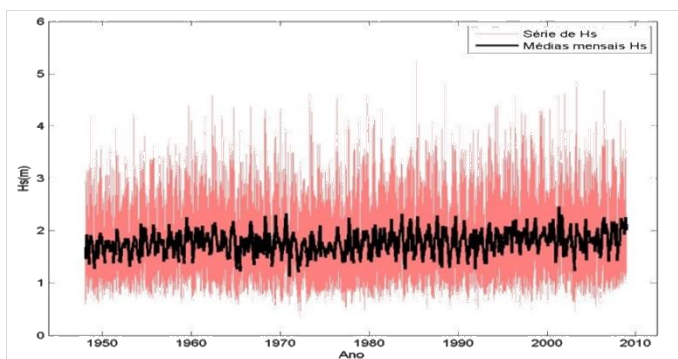


## 5. RESULTADOS

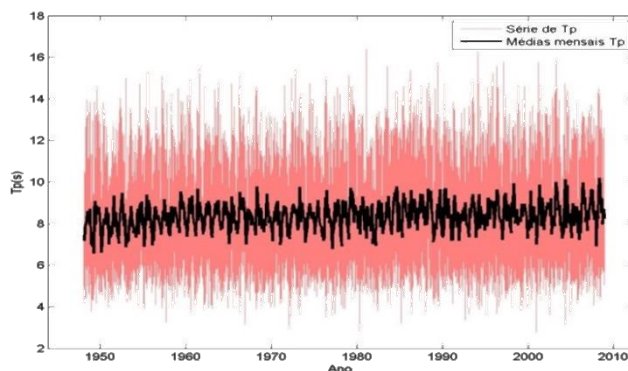
### 5.1. ANÁLISE DA VARIABILIDADE DO CLIMA DE ONDAS EM ÁGUAS PROFUNDAS ( $h > L/20$ )

#### 5.1.1. Estatística descritiva

As séries temporais de altura significativa de onda ( $H_s$ ) e período de pico ( $T_p$ ) para o ponto DOW selecionado em águas profundas (75m) estão apresentados nas Figuras 33 e 34, respectivamente. Nas mesmas figuras também estão representadas as médias mensais da série de dados.



**Figura 33 - Série temporal de  $H_s$  no ponto DOW selecionado. Em preto são as médias mensais de  $H_s$ .**

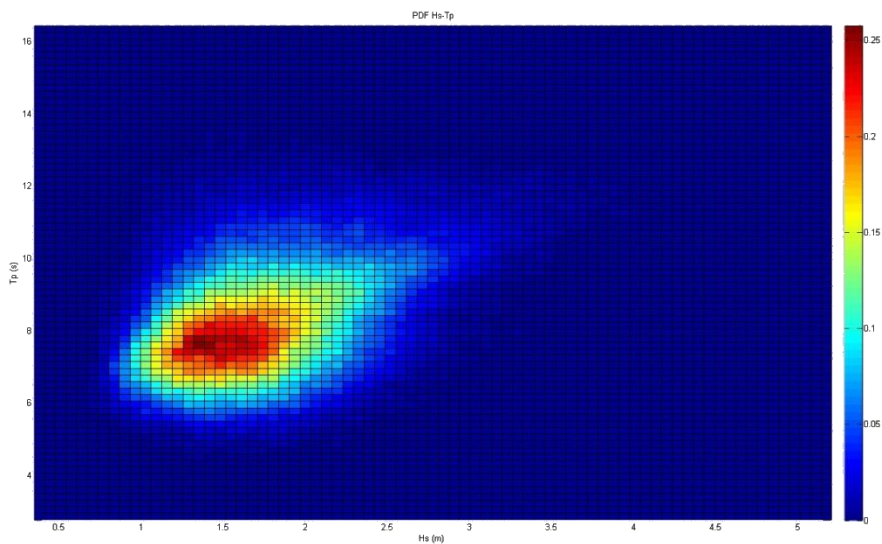


**Figura 34 - Série temporal de  $T_p$  no ponto DOW selecionado. Em preto são as médias mensais de  $T_p$ .**

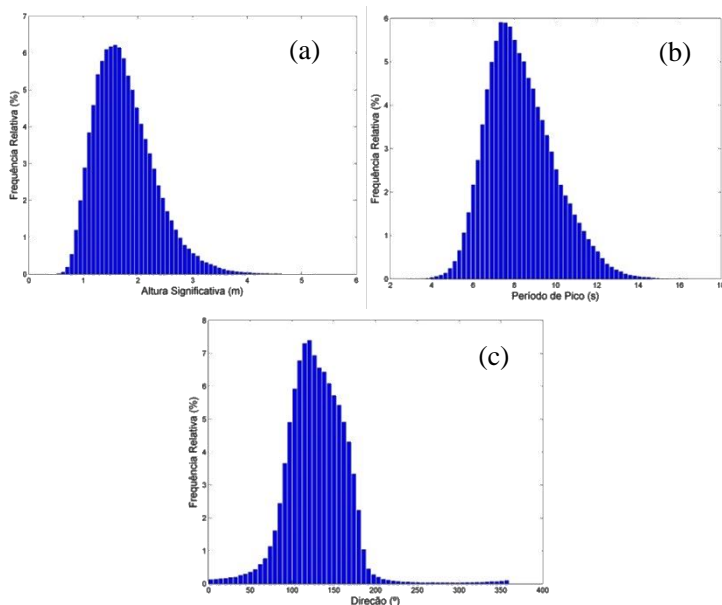
Pode-se observar que os resultados de  $H_s$  variam principalmente entre alturas de 0,7 à 4,0 m, chegando a um valor máximo de 5,2 m. Já o  $T_p$  varia principalmente entre 4 e 15 s, chegando a máximos de 16,4 s.

A distribuição conjunta de  $H_s$  e  $T_p$  demonstra que as ondas médias e mais frequentes da área de estudo são de períodos de cerca de 8 s com alturas de ondas de 1,5 m (Figura 35). Essa informação é confirmada através de histogramas de  $H_s$  e  $T_p$  (Figura 36a e 36b).

Na Figura 36c o histograma da direção demonstra que as principais direções de ondas atuantes sobre a dinâmica da região são de E, ESE, SE e SSE que juntas representam 85% dos estados de mar. Ao juntar ondas de S nessa soma, chega-se a 93%.



**Figura 35 - Distribuição conjunta de  $H_s$  e  $T_p$  no ponto DOW selecionado em águas profundas.**



**Figura 36 - Histograma de  $H_s$  (a),  $T_p$  (b) e direção (c) no ponto DOW selecionado.**

Na Figura 37 são representadas as rosas direcionais de  $H_s$  para cada estação do ano. Observa-se que no verão e na primavera as ondulações que chegam a costa de Santa Catarina vêm principalmente do quadrante E – SE, com alguns casos de menor altura de onda provenientes de NE enquanto no inverno ondas do quadrante S – SE passam a ser predominantes. As ondulações de SE predominam no outono.

Nas Tabelas 5 e 6 são apresentados os dados estatísticos para  $H_s$  e  $T_p$  respectivamente, dados médios, modas, medianas, máximos e mínimos para toda a série de 60 anos de dados. Como é possível verificar, maiores alturas de ondas (média de 1,87 m) ocorrem no inverno, seguido da primavera, com alturas máximas de  $H_s$  registradas na série de dados chegando a 5,20 m. Nota-se também que dados de  $T_p$  seguem a mesma variabilidade das estatísticas de  $H_s$ , com maiores  $T_p$  (média de 8,68 s) no inverno e menores  $T_p$  (média de 7,71 s) no verão.

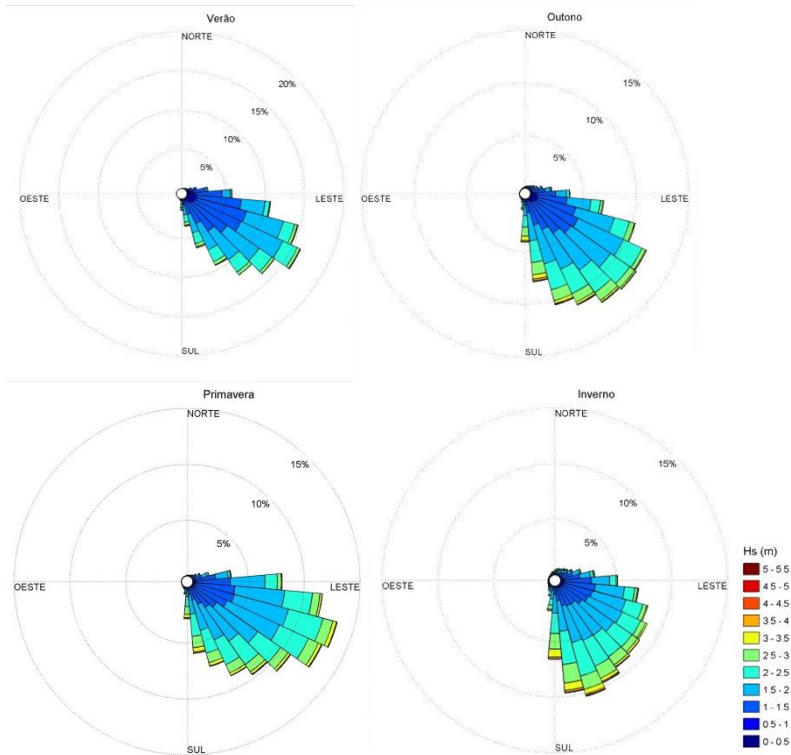


Figura 37 – Rosas direcionais de análises sazonais de ondas do ponto DOW selecionado.

Tabela 5 - Valores de médias, desvio padrão, moda, mediana, máximos, mínimos e tendência linear dos dados de condições médias ( $H_s$ ) e máximas ( $H_{s12}$ ) de altura significativa de onda.

Parâmetro	Média (m)	Desv. P (m)	Moda (m)	Mediana (m)	Max (m) (ano)	Min (m) (ano)	Tendência Linear (cm)*
$H_s$	1,76	0,55	1,65	1,69	5,20 (1985)	0,35 (1972)	0,2639 cm/ano (16,10 cm)
$H_{s12}$	4,30	0,23	4,04	4,24	5,20 (1985)	4,04 (1985)	0,8411 cm/ano (51,31 cm)
Médias de Inverno $H_s$	1,87	0,57	1,59	1,79	5,20 (1985)	0,49 (1979)	0,2962 cm/ano



							(18,07 cm)
Médias de Primav. H <sub>s</sub>	1,86	0,53	1,66	1,79	4,55 (1979)	0,63 (1958)	0,2766 cm/ano (16,87 cm)
Médias de Verão H <sub>s</sub>	1,57	0,47	1,08	1,50	4,62 (2002)	0,47 (1972)	0,1451 cm/ano (8,85 cm)
Médias de Outono H <sub>s</sub>	1,75	0,55	1,33	1,67	4,83 (2003)	0,35 (1972)	0,3437 cm/ano (20,97 cm)

\* Tendência linear = Aumento da H<sub>s</sub> por ano (e total nos 60 anos analisados).

**Tabela 6 - Valores de médias, desvio padrão, moda, mediana, máximos, mínimos e tendência linear dos dados de condições médias (T<sub>p</sub>) e máximas T<sub>p12</sub>) de período de pico.**

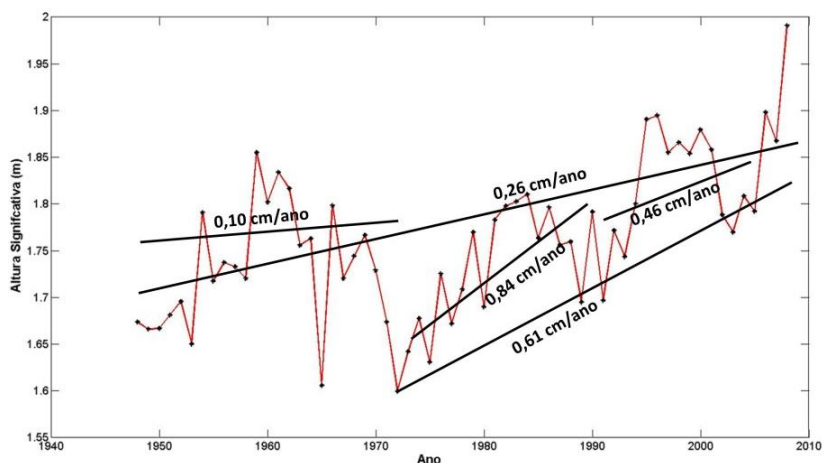
Parâmetro	Média (s)	Desv. P (s)	Moda (s)	Mediana (s)	Max (s) (ano)	Min (s) (ano)	Tendência Linear (s)*
T <sub>p</sub>	8,32	1,63	10,77	8,11	16,40 (1981)	2,77 (2001)	0,0076 s/ano (0,47 s)
Tp assoc. com H <sub>s12</sub>	12,01	1,16	13,13	12,11	14,57 (1985)	7,15 (1985)	0,0253 s/ano (1,54 s)
Médias de Inverno T <sub>p</sub>	8,68	1,70	10,77	8,52	15,75 (1989)	3,14 (2004)	0,0050 s/ano (0,31 s)
Médias de Primav. T <sub>p</sub>	8,42	1,48	8,83	8,25	15,42 (1972)	3,25 (1957)	0,0031 s/ano (0,19 s)
Médias de Verão T <sub>p</sub>	7,71	1,40	11,89	7,52	15,21 (1995)	2,77 (2001)	0,0095 s/ano (0,58 s)
Médias de Outono T <sub>p</sub>	8,45	1,74	11,89	8,24	16,40 (1981)	2,84 (1980)	0,0132 s/ano (0,81 s)

\* Tendência linear = Aumento do T<sub>p</sub> por ano (e total nos 60 anos analisados).

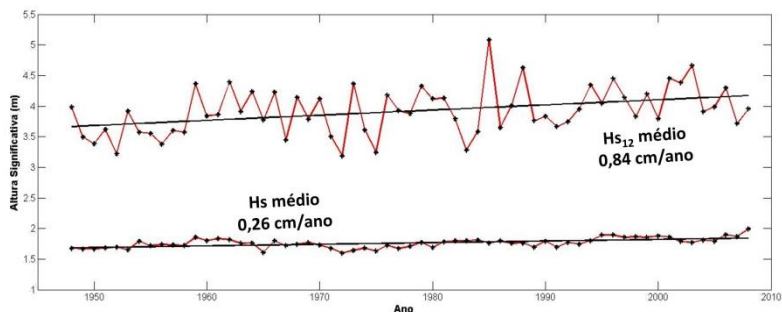
Ainda nas Tabelas 5 e 6, estão apresentados os valores de tendência de variação média anual e sazonal de H<sub>s</sub>, H<sub>s12</sub> e T<sub>p</sub> ao longo dos 60 anos analisados. A Figura 38 representa a tendência de variação

de  $H_s$  médio anual. O que se verifica é uma tendência geral de aumento nos valores médios de  $H_s$ , com incremento de 0,26 cm/ano, com um total de aumento de 16,1 cm para os 60 anos. Cabe ressaltar que os valores de tendência não são constantes e maiores ou menores incrementos podem ser verificados em distintos trechos da série (Figura 38), podendo alcançar um incremento de até 0,84 cm/ano em um dos períodos. Além disso, as tendências apresentam incrementos diferentes nas estações do ano, com maiores incrementos sendo verificados na estação de outono (0,34 cm/ano) e menores no verão (0,14 cm/ano) (ver Tabela 5).

Na Figura 39 estão apresentadas as tendências de  $H_s$  e  $H_{s12}$ . Como é possível verificar, a tendência de incremento de  $H_{s12}$  ao longo dos anos é mais expressiva se comparada com a de  $H_s$ , alcançando um incremento de 0,84 cm/ano, com um total de 51,31 cm para o total de anos analisados.

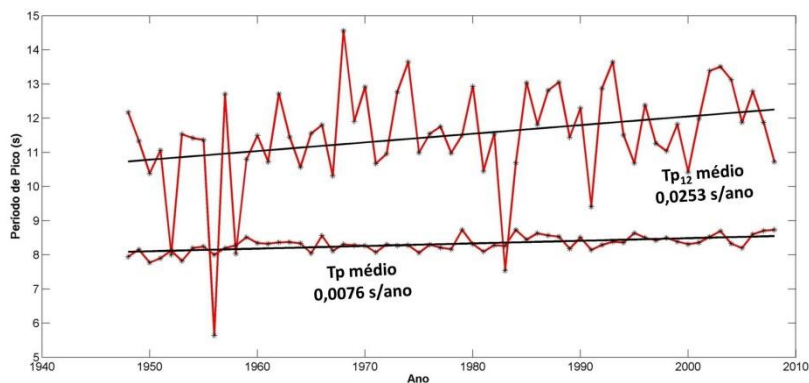


**Figura 38 - Análise de tendência linear para dados anuais médios de  $H_s$ .**



**Figura 39 - Análise de tendência linear para dados anuais médios de  $H_s$  e  $H_{s12}$ .**

Com relação aos valores de tendência de  $T_p$  médio anual (ver Tabela 6), também se verifica uma tendência de aumento nos valores, com aumento de 0,0076 s/ano ao longo dos 60 anos analisados, com um total de aumento de 0,47 s. Maiores variações são verificadas nos valores de  $T_p$  associado a  $H_{s12}$  (valor médio anual) com incremento de 0,0253 s/ano, totalizando 1,54 s para a série toda (Figura 40). Uma vez mais, as tendências sazonais indicam maiores incrementos de  $T_p$  no outono e menores incrementos na primavera. Como é possível verificar nos resultados apresentados até o momento, o outono é a estação que sofre maiores mudanças.



**Figura 40 - Análise de tendência linear para dados anuais médios de  $T_p$  e  $T_{p12}$ .**

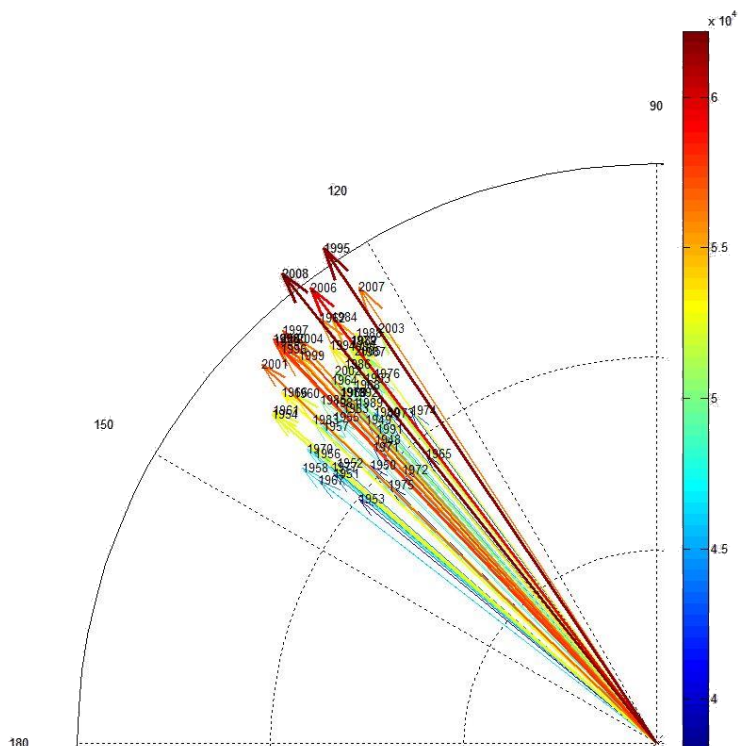
No que diz respeito à tendência de giro no fluxo de energia direcional (Tabela 7), se verificou um incremento nos valores de direção de 0,1533 °/ano. Isso indica uma tendência de rotação na direção de fluxo médio para Sul, tendo rotacionado nos últimos 60 anos um total de 9,35°. Assim como as anteriores, também aqui as tendências de variação por estações do ano se apresentou de forma variada, mas aqui com maiores aumentos na direção do fluxo de energia nos meses de inverno (0,2389 °/ano) e menores aumentos na primavera (0,0464 °/ano).

**Tabela 7 - Valores de médias, desvio padrão e tendência linear dos dados de condições médias de direção de onda ( $\theta_m$ ).**

Parâmetro	Média (°)	Desv. Pad. (°)	Tendência Linear (°)*
$\theta_m$	137,74	4,75	0,1533 °/ano (9,35°)
Média de Inverno $\theta_m$	144,58	8,30	0,2389 °/ano (14,57°)
Média de Primavera $\theta_m$	131,52	7,34	0,0464 °/ano (2,83°)
Média de Verão $\theta_m$	131,26	6,05	0,1063 °/ano (6,48°)
Média de Outono $\theta_m$	141,87	8,10	0,1964 °/ano (11,98°)

\* Tendência linear = Aumento da  $\theta_m$  por ano (e total nos 60 anos analisados).

Por fim, ao analisarmos o fluxo de energia de onda de acordo com os anos e sua relação com as direções médias, pode-se confirmar que nos anos mais recentes as ondas estão vindo mais do quadrante SE – S e com maiores energias de ondas se comparado com os primeiros anos desta análise (Figura 41).



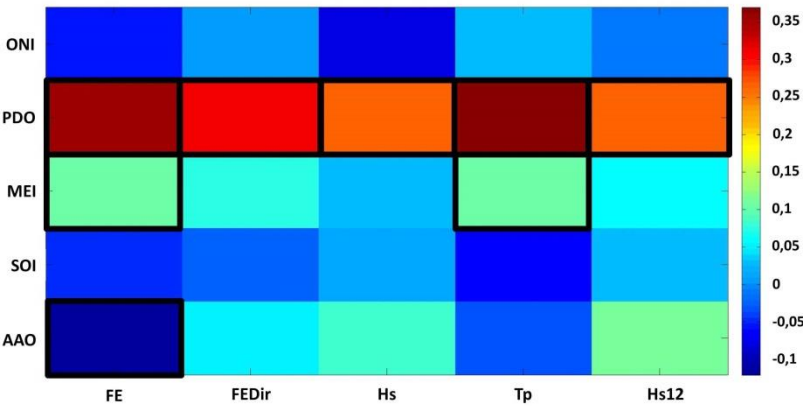
**Figura 41 - Fluxo direcional de energia médio para todos os anos analisados. Unidade de fluxo de energia em J/m.s.**

### 5.1.2. Correlação com índices climáticos

Na tentativa de explicar a variabilidade dos dados de clima de ondas através da relação entre a ocorrência e intensidade das variáveis de onda e fenômenos meteorológicos de baixa frequência, realizou-se ainda uma correlação linear entre as variáveis  $H_s$ ,  $H_{s12}$ ,  $T_p$ , FE e FE direcional com 5 diferentes índices climáticos (AAO, MEI, ONI, PDO, SOI). Por não apresentarem distribuição normal a correlação utilizada foi de Spearman Rank. Os resultados estão apresentados na Tabela 8 e Figura 42.

**Tabela 8 – Valores de correlação entre as variáveis do clima de ondas e os índices climáticos. Valores em vermelho representam significância da correlação. Quanto mais próximo de zero menor a correlação. Nível de significância das correlações de 95%.**

	FE	FEDir	Hs	Tp	Hs12
ONI	-0,055	0,005	-0,080	0,031	-0,011
PDO	0,360	0,313	0,266	0,370	0,264
MEI	0,102	0,073	0,031	0,109	0,061
SOI	-0,047	-0,025	0,010	-0,063	0,030
AAO	-0,121	0,050	0,082	-0,036	0,113



**Figura 42 - Correlação entre as variáveis do clima de ondas e os índices climáticos. As caixas pretas representam significância da correlação.**

Como se pode observar, existe correlação entre 3 diferentes índices, PDO, MEI e AAO, com pelo menos uma variável de ondas. E apenas o PDO obteve correlação com todas as variáveis, sendo estas positivas, ou seja, apresentam comportamento diretamente proporcional. Ainda na Tabela 8 e Figura 42 é possível observar que o fluxo de energia é o que apresenta correlação com mais índices (3).

## 5.2. BARRA DA LAGOA – MOÇAMBIQUE

### 5.2.1. Propagação de ondas para águas rasas

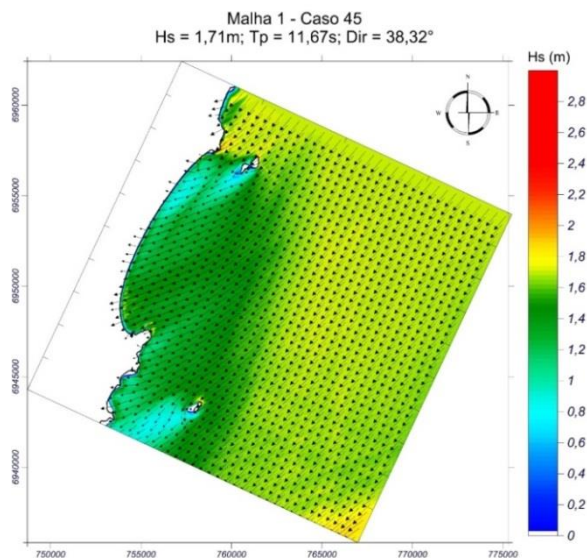
Os resultados de propagação de ondas para a praia da Barra da Lagoa - Moçambique serão apresentados resumidamente com 3 casos representando condições de mar distintas, sendo 1 caso para cada malha (diferentes direções de propagação de ondas).

Pode ser observado nos resultados que, nos casos vindos de norte (Figura 43) e nordeste, as ondas sofrem difração ao chegar na ilha das Aranhas, atenuando assim a energia incidente a praia, onde as ondas chegam com uma altura homogênea em toda enseada.

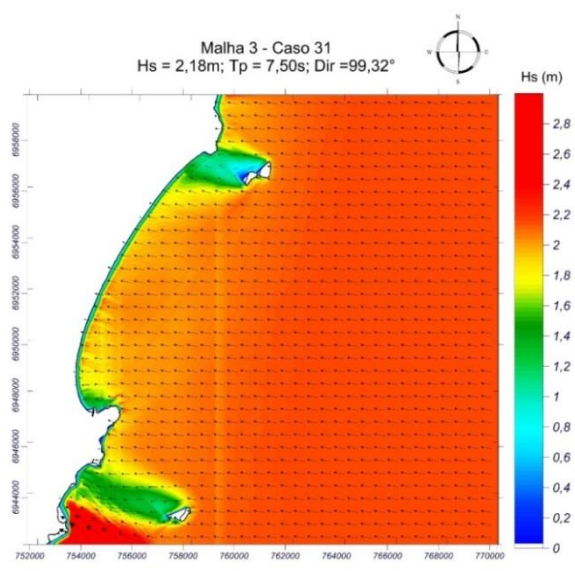
Nos casos de leste (Figura 44) e sudeste as ondas chegam direto na praia, sofrendo leve difração na ilha do Xavier ao sul, ainda assim pode-se observar que as ondas chegam a praia com maiores alturas de onda. Neste caso, se verifica um aumento nos valores de  $H_s$  em direção ao norte da área de estudo.

Por fim os casos de sul (Figura 45) sofrem atenuação da energia no promontório da Ponta da Galheta e na ilha do Xavier, formando uma grande área de sombra na parte sul e central da enseada onde ondas de menor altura chegam à praia.

Dessa forma percebe-se que, devido ao grau de exposição às ondas, a área ao sul da enseada é a área que recebe ondas com menores tamanhos de  $H_s$ , por possuir uma zona de sombra frente aos maiores casos de ondas (SE-S), e tais valores sofrem aumento em direção ao norte.

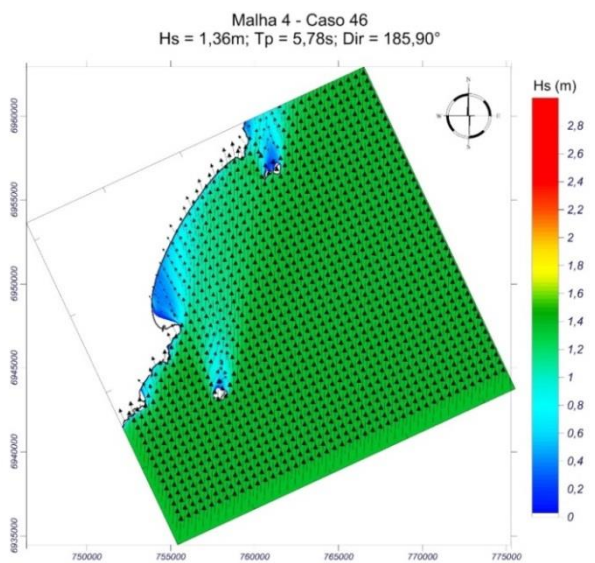


**Figura 43 - Exemplo de caso de onda propagado nas praias da Barra da Lagoa – Moçambique com direção de NE.**



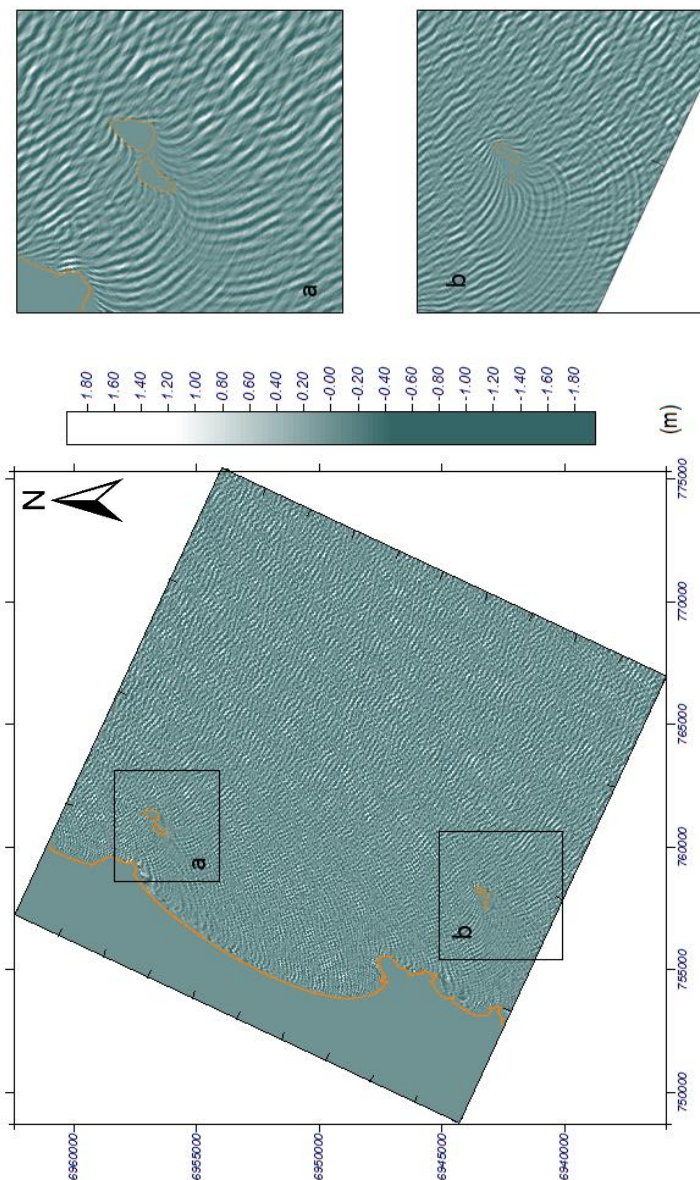
**Figura 44 - Exemplo de caso de onda propagado nas praias da Barra da Lagoa – Moçambique com direção de E.**





**Figura 45 - Exemplo de caso de ondas propagado nas praias da Barra da Lagoa – Moçambique com direção S-SE.**

De forma ilustrativa, estão apresentados na Figura 46, os gráficos de superfície livre do clima de ondas na área de estudo. Em tal figura, é possível verificar a representação do processo de difração por parte do modelo aplicado nas ilhas próximas às praias de Moçambique – Barra da Lagoa.

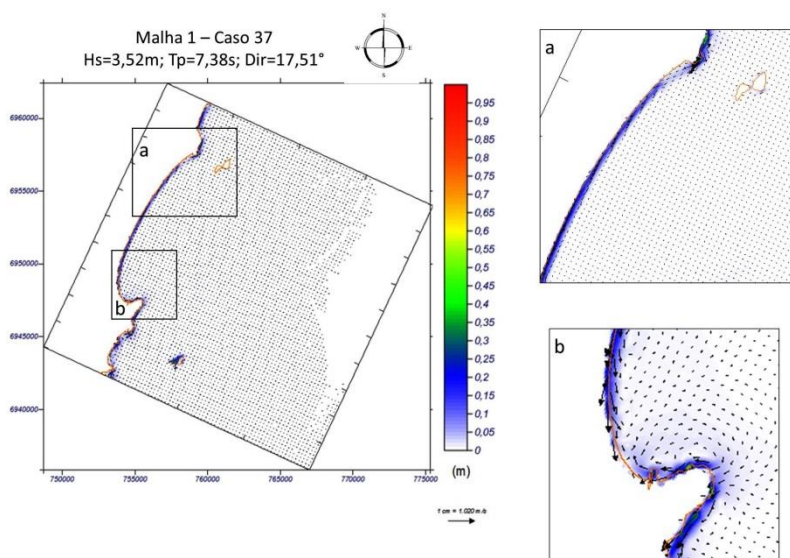


**Figura 46 - Gráfico de superfície livre: representação do processo de difração por parte do modelo OLUCA – SP nas praias da Barra da Lagoa – Moçambique.**

### 5.2.2. Simulação de correntes

Os resultados de propagação de correntes para a praia da Barra da Lagoa - Moçambique serão apresentados resumidamente com 3 casos, sendo 1 caso para cada malha (representando diferentes direções de propagação de ondas).

As malhas com direções de ondas vindas de norte e nordeste (Figura 47) geram correntes com direção sul. Também se verifica que o comportamento das correntes geradas pelas ondas de nordeste é muito similar ao observado pelas ondas providas de norte, porém com menores intensidades devido a menor obliquidade de ondas, gerando assim correntes mais fracas. Percebe-se ainda que os promontórios e ilhas localizados nas duas pontas da enseada também protegem as áreas adjacentes diminuindo a ação das correntes sobre tais locais.

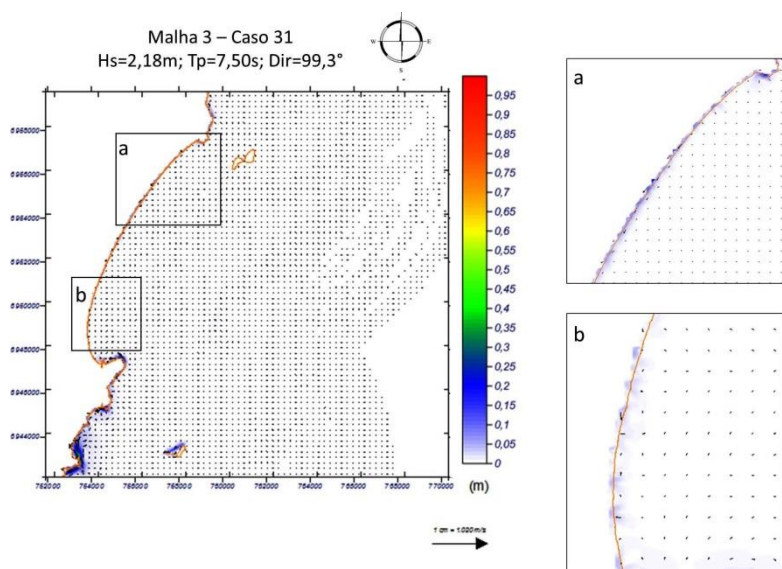


**Figura 47 - Magnitude de correntes – Exemplo de caso com ondas vindas de NNE nas praias da Barra da Lagoa - Moçambique.**

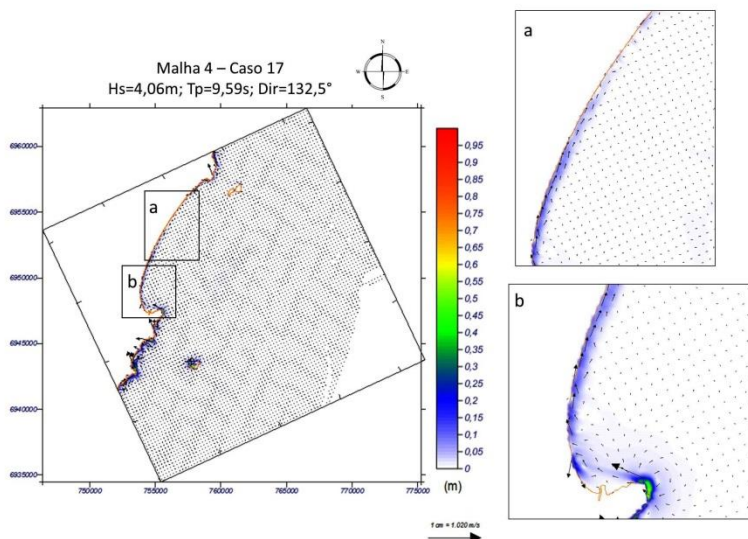
Com relação aos casos com ondas providas de leste (Figura 48), as correntes são pouco significativas, com valores máximos de 0,05m/s sendo observados junto aos promontórios. Este fato se justifica pela incidência perpendicular da onda na praia. Ao incidir

perpendicularmente não há gradiente de altura de onda, o que resulta em correntes quase nulas ao longo de toda a praia.

Por fim, casos de ondas de direção sul-sudeste geram correntes em direção ao norte na maior parte da praia devido à obliquidade com que as ondas atingem a costa (Figura 49). No entanto junto ao promontório sul se verificam correntes em direção ao sul (na direção do promontório). Estas correntes são geradas por gradiente de altura de onda onde a zona da praia mais próxima ao promontório recebe menor energia de onda. O gradiente de  $H_s$  resulta em correntes das maiores para as menores ondas neste local.



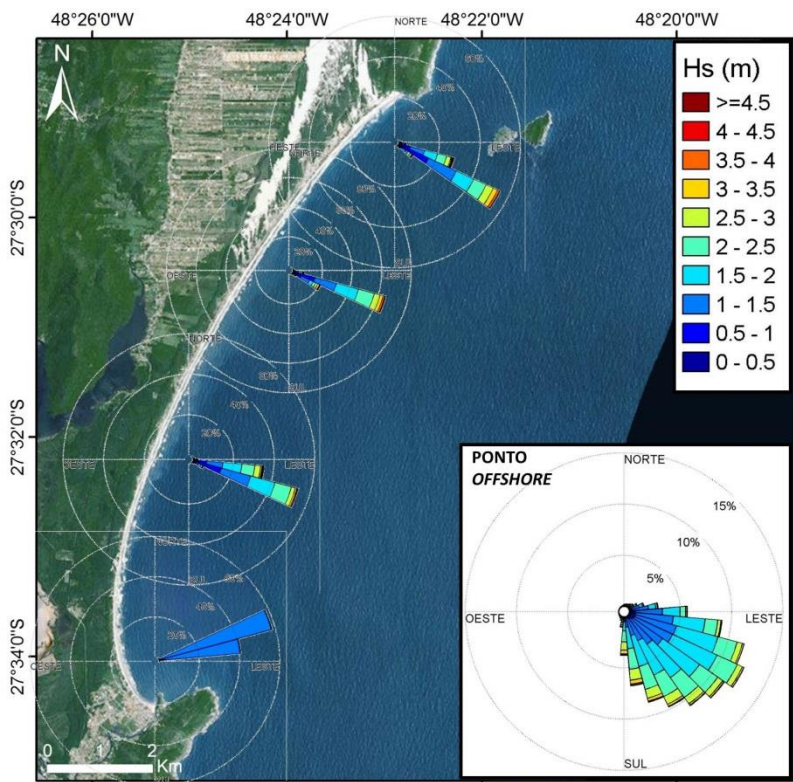
**Figura 48 - Magnitude de correntes – Exemplo de caso com ondas vindas de E nas praias da Barra da Lagoa - Moçambique.**



**Figura 49 - Magnitude de correntes – Exemplo de caso com ondas vindas de SE nas praias da Barra da Lagoa - Moçambique.**

### 5.2.3. Transporte de sedimentos litorâneos

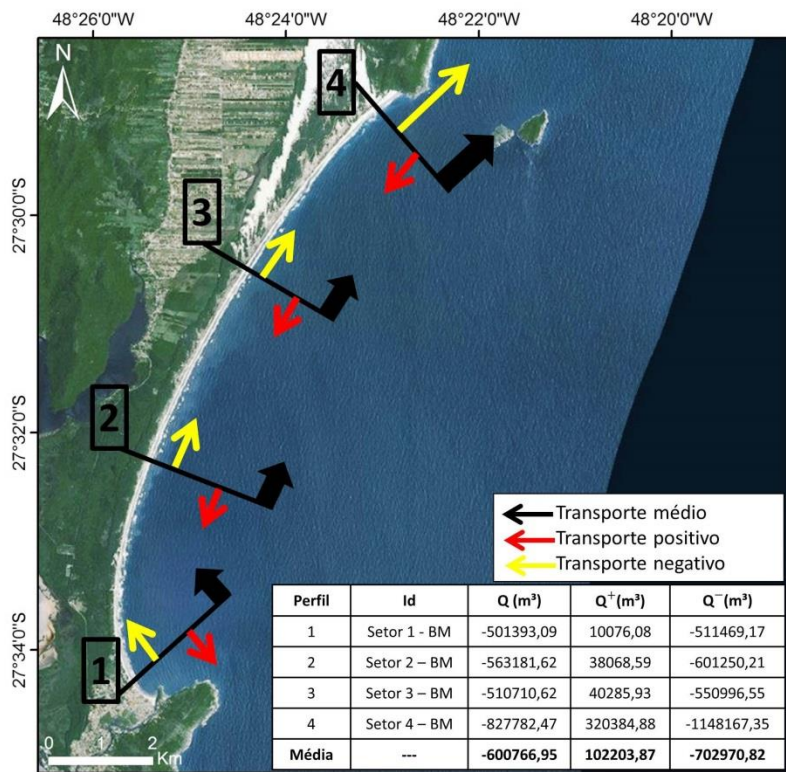
Os resultados das séries reconstruídas de ondas em águas rasas encontram-se na Figura 50. Pode-se notar que ao chegar próximo a praia as ondas sofrem o efeito da refração e difração, alterando, para cada setor, a direção principal de propagação, assim como são encontradas menores alturas de ondas nessa região.



**Figura 50 - Rosas direcionais das séries de ondas reconstruídas nas praias da Barra da Lagoa - Moçambique. No detalhe a rosa de ondas do ponto offshore.**

A partir da definição dos 4 setores nas praias da Barra da Lagoa – Moçambique foram calculadas as taxas médias anuais de transporte potencial longitudinal no período de 1948 a 2008 para cada setor. Para tal foram utilizados os valores de sedimento médio apresentados anteriormente na Tabela 4. Os resultados estão apresentados na Figura 51. Nesta figura as flechas pretas representam a magnitude e direção do transporte médio bruto para todo o intervalo de tempo estudado, as flechas vermelhas o transporte médio positivo (direção Sul) e as flechas amarelas o transporte médio negativo (direção Norte).



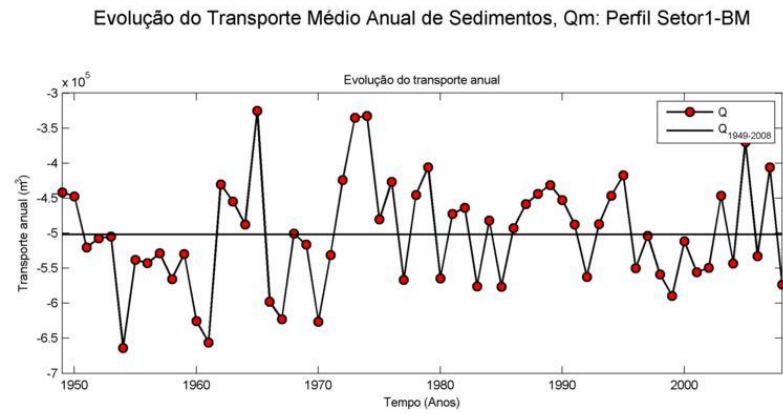


**Figura 51 – Taxas médias anuais de transporte de sedimento para os 4 setores das praias Barra da Lagoa – Moçambique.**

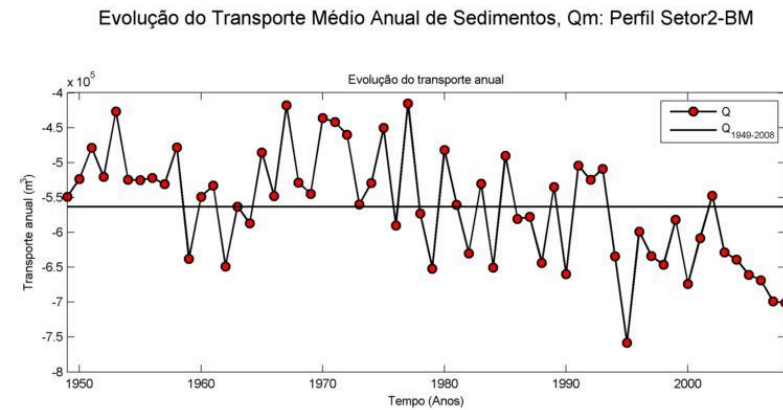
A partir dos resultados encontrados na Figura 51 nota-se que, de forma geral, ao longo da enseada o transporte preferencial é de sul para norte, havendo também transporte, mas de menor magnitude de norte para sul. As maiores taxas de transporte ocorrem no setor 4. É possível observar também, através das taxas médias de transporte de sedimentos, que entre os setores 2 e 3 ocorre um acúmulo de sedimentos da ordem de 5000 m³/ano, porém até o setor 4 há uma taxa alta de transporte de cerca de 32.000 m³/ano.

As Figuras 52 à 55 apresentam a evolução do transporte médio anual de sedimentos, onde destacam-se os setores 2, 3 e 4 que com o passar dos anos estão transportando mais sedimentos, diferentemente do setor 1 que parece se manter estável. Observa-se que em todos os setores o transporte anual médio é negativo, ou seja, o transporte é predominante

para norte, com uma média geral de transporte de 600.767 m<sup>3</sup>/ano (ver Figura 51).



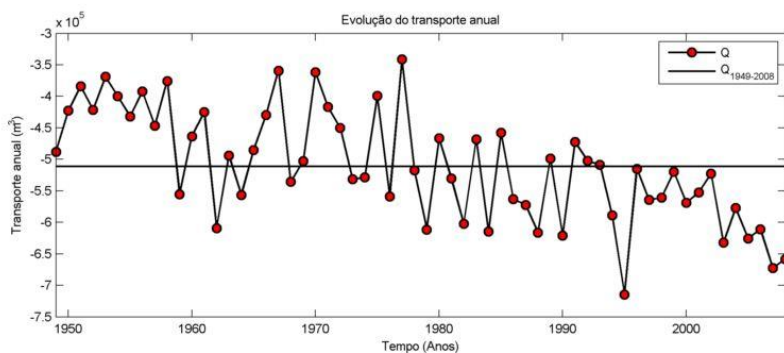
**Figura 52 - Evolução do transporte médio anual de sedimentos do setor 1 nas praias da Barra da Lagoa - Moçambique.**



**Figura 53 - Evolução do transporte médio anual de sedimentos do setor 2 nas praias da Barra da Lagoa - Moçambique.**

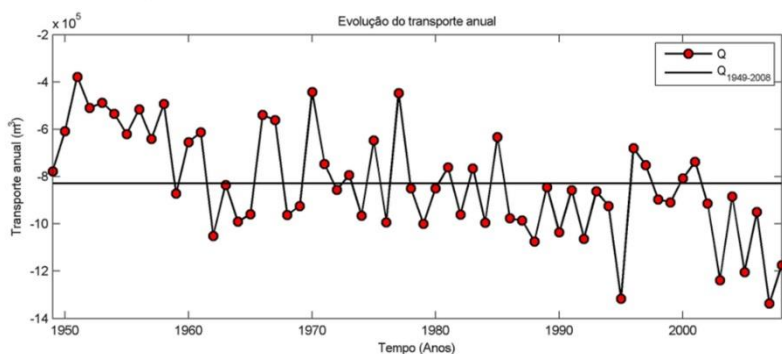


Evolução do Transporte Médio Anual de Sedimentos, Qm: Perfil Setor3-BM



**Figura 54 - Evolução do transporte médio anual de sedimentos do setor 3 nas praias da Barra da Lagoa - Moçambique.**

Evolução do Transporte Médio Anual de Sedimentos, Qm: Perfil Setor4-BM



**Figura 55 - Evolução do transporte médio anual de sedimentos do setor 4 nas praias da Barra da Lagoa - Moçambique.**

#### 5.2.4. Análise do perfil praial

Os resultados para a profundidade de fechamento  $h_*$  são encontrados na Tabela 9, já os resultados para os perfis de Dean calculados estão na Figura 56.

**Tabela 9 - Variáveis utilizadas e resultado do cálculo da profundidade de fechamento obtidos para as praias analisadas de acordo com Hallermeier (1981).**

Praia	Setor	$H_{s12}$ (m)	$\bar{H}_s$ (m)	$\sigma$ (m)	Prof. fechamento
<b>Barra da Lagoa e Moçambique</b>	1	1,56	1,07	0,09	4,16
	2	2,81	1,62	0,15	7,30
	3	3,01	1,64	0,17	7,87
	4	2,47	1,49	0,10	6,07

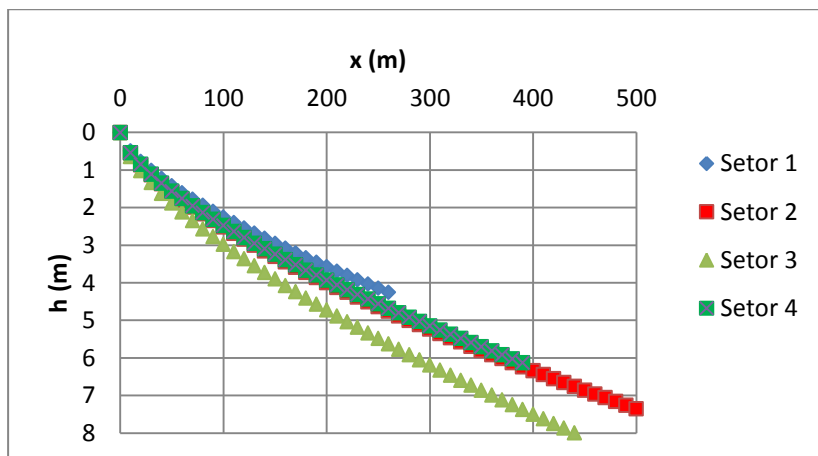
De acordo com os resultados encontrados percebe-se que a maior profundidade de fechamento encontra-se no setor 3, o setor com as maiores ondas da enseada. De forma geral a profundidade de fechamento aumenta de acordo com a exposição às ondas, assim como a declividade do perfil (Figura 56).

É importante ressaltar aqui que o parâmetro de escala de sedimentos (A) foi calculado, mas ao apresentar um valor ligeiramente menor que o da tabela proposta por Dean (ex: Setor 1 calculado 0,104 e teórico 0,109) optou-se por utilizar os valores teóricos propostos pelo autor para o cálculo do perfil de equilíbrio (Tabela 10).

**Tabela 10 - Tamanho de grão utilizado, parâmetro de escala de sedimentos A calculado e teórico.**

Praia	Setor	Tamanho médio de grão (mm)	Parâmetro A calculado	Parâmetro A teórico
Barra da Lagoa - Moçambique	1	0,23	0,104	0,109
	2	0,29	0,117	0,123
	3	0,41	0,138	0,1466
	4	0,28	0,115	0,121

Sobre o tamanho médio de sedimento é possível observar que na Barra da Lagoa – Moçambique os valores apresentaram uma variabilidade longitudinal na enseada, passando de areia fina na região sul (setor 1) para areia média no restante dos setores, com destaque aos maiores tamanhos de grãos no setor 3 das praias (ver Tabela 10).



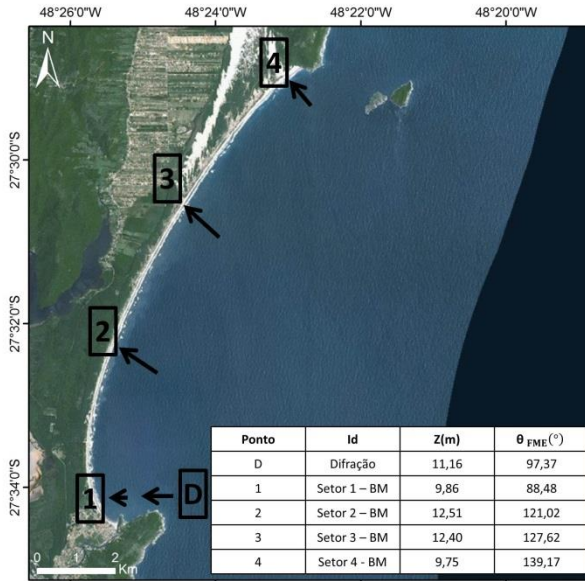
**Figura 56 - Perfis de equilíbrio nos 4 setores das praias da Barra da Lagoa - Moçambique.**

#### **5.2.5. Análise da forma em planta**

A partir da propagação de ondas com o modelo OLUCA é possível perceber onde se encontra o ponto de difração nas praias da Barra da Lagoa – Moçambique, neste caso, na Ponta da Galheta (ver Figura 1) para então calcular, através da Eq. 3, o fluxo médio de energia direcional no ponto de difração das ondas na praia. O resultado deste, assim como o resultado dos fluxos médios de energia direcionais para cada setor das praias Barra da Lagoa – Moçambique são encontrados na Figura 57.

Assim, levando em consideração o ponto de difração na Ponta da Galheta e o fluxo médio de energia direcional calculado neste ponto, a forma em planta das praias da Barra da Lagoa – Moçambique encontra-se na Figura 58.

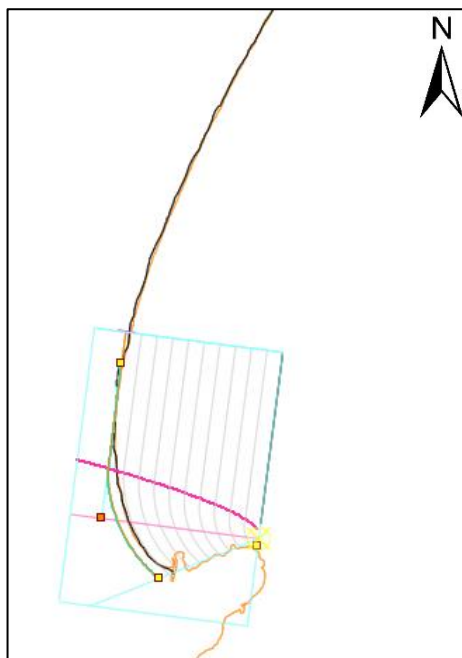
A partir do cálculo da forma em planta nota-se que a praia se encontra em equilíbrio dinâmico, ou seja, a praia está tentando se ajustar frente ao fluxo direcional de energia. Porém, devido a presença de um segundo promontório entre a praia da Barra da Lagoa e a Prainha não é possível considerar apenas um ponto de difração nesta praia.



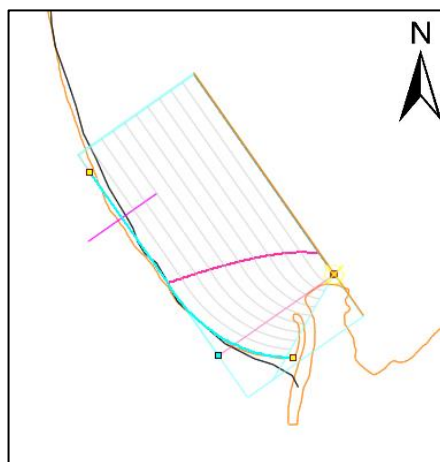
**Figura 57 - Fluxo de energia direcional para o ponto de difração de onda e para os 4 setores das praias da Barra da Lagoa - Moçambique.**

Levando em conta que há um segundo desenho de forma em planta a partir do ponto de difração em frente a este promontório, é calculado um novo ajuste para o início da praia da Barra da Lagoa (Figura 59). Analisando apenas o desenho deste segundo ponto de difração, pode-se dizer que a forma em planta encontra-se em equilíbrio estático neste setor da praia.

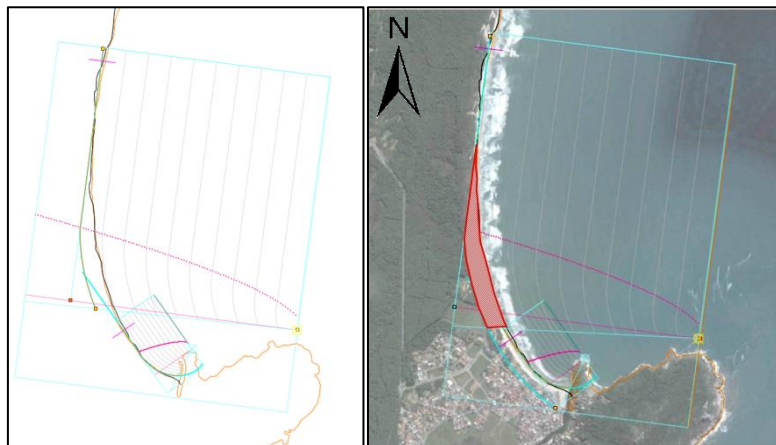
Por fim, para o cálculo da forma em planta destas praias, ao juntar os dois desenhos, tem-se a Figura 60, que apresenta o trecho inicial da praia em equilíbrio, porém com uma parte, localizada por volta da região do Camping da Barra apresentando um retrocesso médio de 115m. A Figura 60 ilustra a zona da praia em equilíbrio dinâmico (hachurada em vermelho).



**Figura 58 - Forma em planta da Barra da Lagoa - Moçambique conforme o fluxo médio de energia direcional e a equação de Hsu e Evans (1989).**



**Figura 59 - Forma em planta da Barra da Lagoa - Moçambique levando em conta o promontório menor que se encontra entre a praia da Barra da Lagoa e a Prainha, conforme o fluxo médio de energia direcional e a equação de Hsu e Evans (1989).**



**Figura 60 - Forma em planta combinada da Barra da Lagoa - Moçambique conforme o fluxo médio de energia direcional, a equação de Hsu e Evans (1989) e levando em consideração que há dois pontos de difração. A área hachurada na segunda imagem identifica a área que está em processo de erosão.**

### 5.3. INGLESES

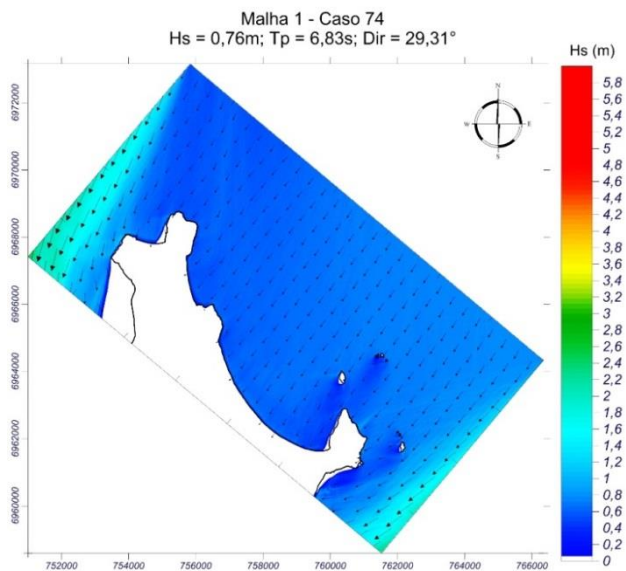
#### 5.3.1. Propagação de ondas para águas rasas

Os resultados de propagação de ondas para a praia dos Ingleses serão apresentados resumidamente com 3 casos representando as distintas condições de mar.

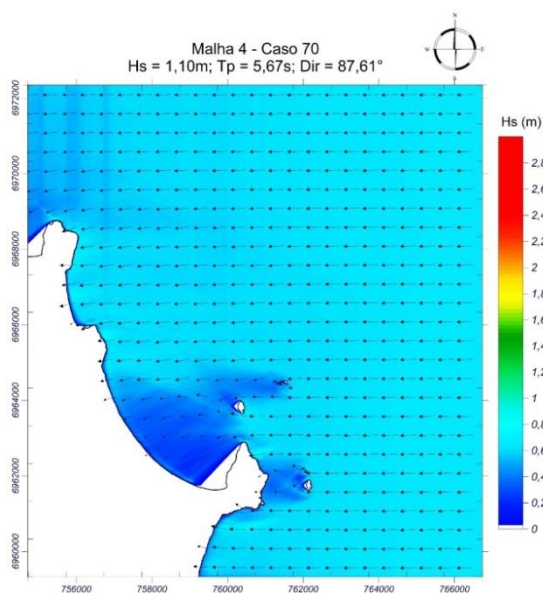
Pode ser observado nos resultados que nos casos vindos de norte - nordeste (Figura 61) as ondas chegam à praia sem enfrentar obstáculos, com altura de onda homogênea em toda a linha de costa apresentando apenas uma pequena atenuação da energia através das ilhas do Mata - Fome e Moleques do Norte onde ocorre a difração.

Nos casos de ondas providos de leste (Figura 62) e sudeste (Figura 63), tanto o promontório quanto as ilhas geram uma região de sombra, onde a energia que chega à costa é atenuada de forma considerável (diminuindo a  $H_s$  em mais da metade). Pode-se dizer com base nesses resultados que quanto mais voltadas ao sul forem às direções de onda, maior será a região de sombra e menor a altura de onda que chega a praia. Dessa forma a energia de onda na praia dos

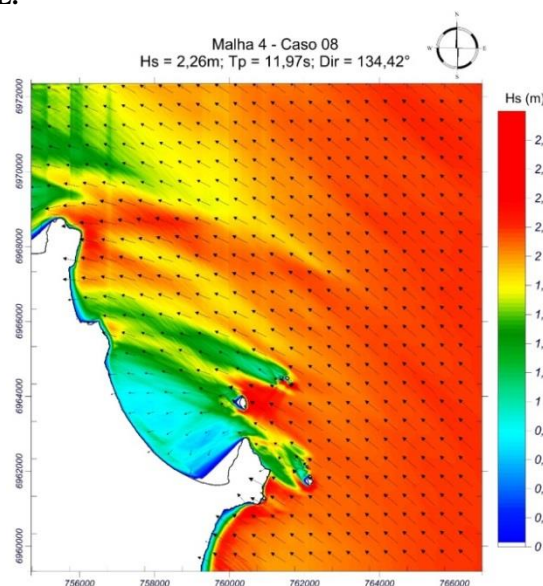
Ingleses aumenta com os casos de direção sudeste a casos com direção noroeste.



**Figura 61 - Exemplo de caso de onda propagado na praia dos Ingleses com direção de NE.**



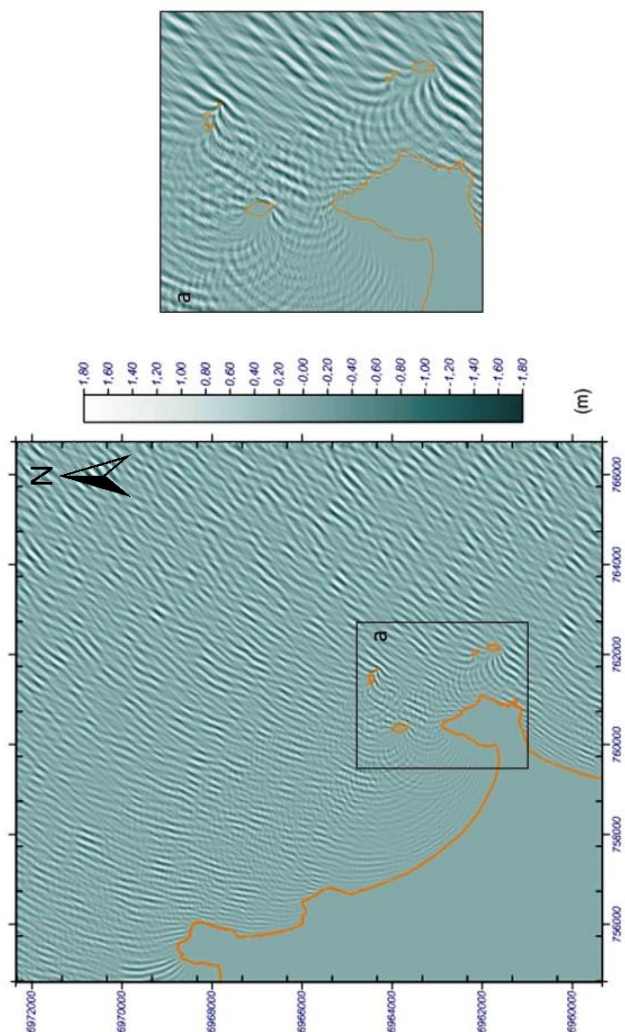
**Figura 62 - Exemplo de caso de onda propagado na praia dos Ingleses com direção de E.**



**Figura 63 - Exemplo de caso de onda propagado na praia dos Ingleses com direção de SE.**



De forma ilustrativa, estão apresentados na Figura 64, os gráficos de superfície livre na área de estudo. Em tal figura, é possível verificar a representação do processo de difração por parte do modelo aplicado em zonas de difração no promontório e nas ilhas próximas a praia dos Ingleses.

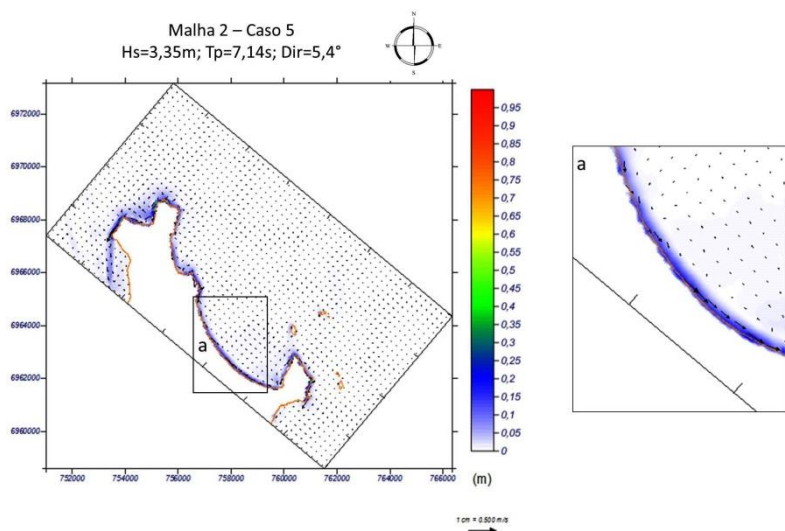


**Figura 64 - Gráfico de superfície livre: representação do processo de difração no modelo OLUCA – SP na praia dos Ingleses.**

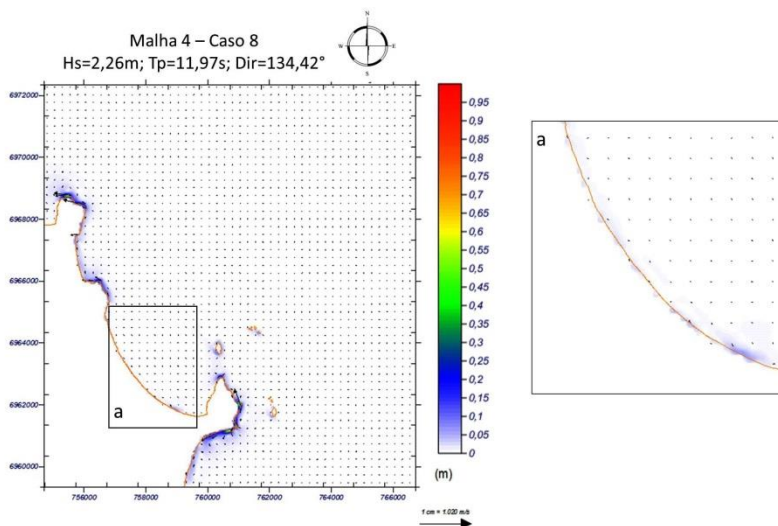
### 5.3.2. Simulação de correntes

Os resultados de propagação de correntes para a praia dos Ingleses serão apresentados resumidamente com 2 casos, sendo 1 caso para cada malha (representando diferentes direções de propagação de ondas).

As malhas com direções de ondas vindas de norte e nordeste (Figura 65) geram correntes com direção sul ao promontório sul e casos do quadrante leste-sudeste (Figura 66) geram correntes para noroeste. Percebe-se que em ambos os casos há uma intensificação das correntes próximos aos promontórios.



**Figura 65 - Magnitude de correntes - Exemplo de caso com ondas vindas de N na praia dos Ingleses.**

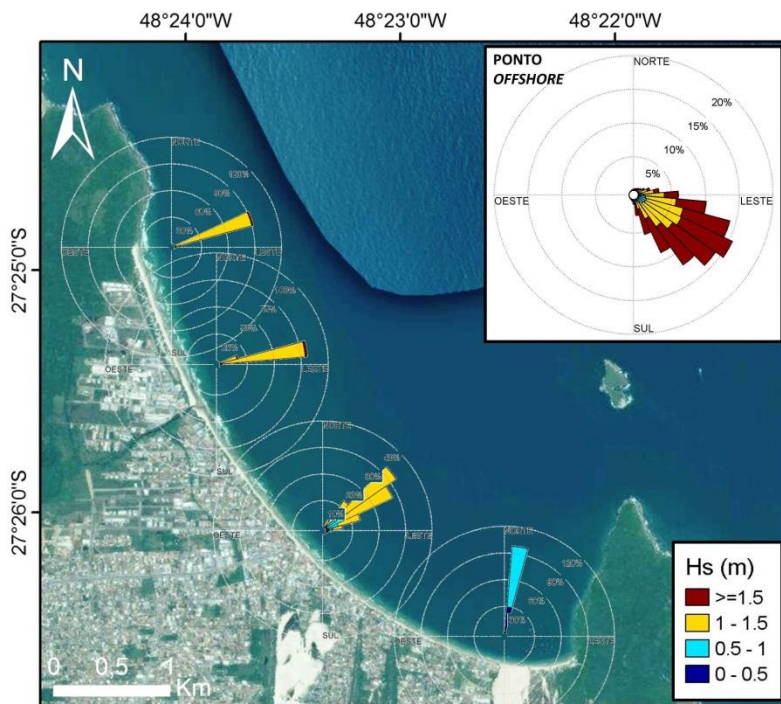


**Figura 66 - Magnitude de correntes - Exemplo de caso com ondas vindas de SE na praia dos Ingleses.**

### 5.3.3. Transporte de sedimentos litorâneo

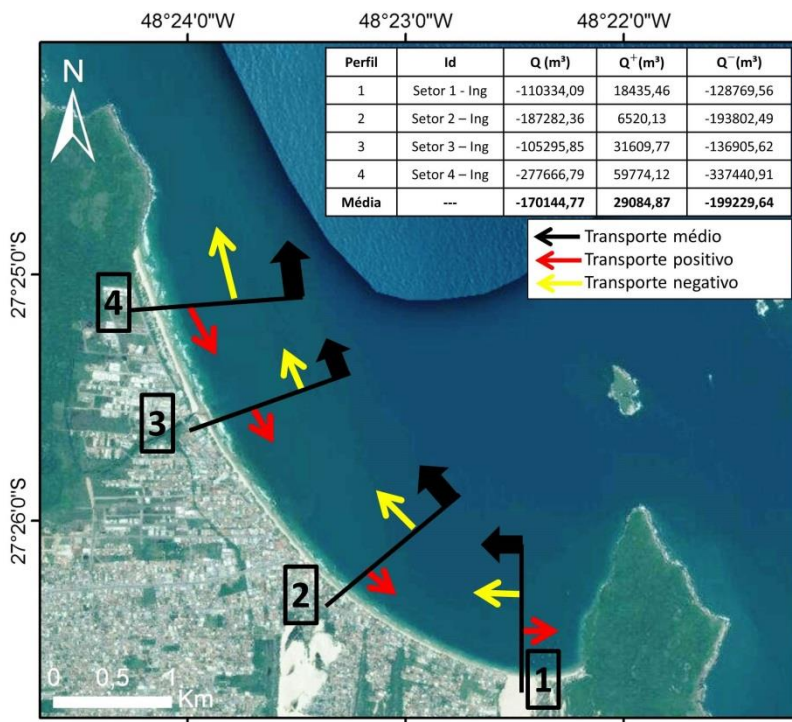
Os resultados das séries reconstruídas de ondas em águas rasas são apresentados na Figura 67. Pode-se notar que ao chegar próximo a praia as ondas sofrem o efeito da refração e difração, alterando, para cada setor, a direção principal de propagação, assim como são encontradas menores alturas de ondas nessa região. Diferentemente das praias da Barra da Lagoa – Moçambique, na praia dos Ingleses o processo de difração é ainda mais sentido por causa da orientação da praia para norte e dos promontórios e ilhas que a cercam. Neste caso, se comparado a Barra da Lagoa – Moçambique, a altura de ondas que chega a praia é muito menor (até 1,5 m).

A partir dos dados de ondas na zona de arrebentação e do tamanho de grão apresentados na Tabela 4, foi então calculado o transporte de sedimentos para a região da praia dos Ingleses (Figura 68). Na Figura 68 as flechas pretas representam a magnitude e direção do transporte médio bruto para todo o intervalo de tempo estudado, as flechas vermelhas o transporte médio positivo e as flechas amarelas o transporte médio negativo.



**Figura 67 - Rosas direcionais das séries de ondas reconstruídas na praia dos Ingleses. No detalhe a rosa de ondas do ponto *offshore*.**

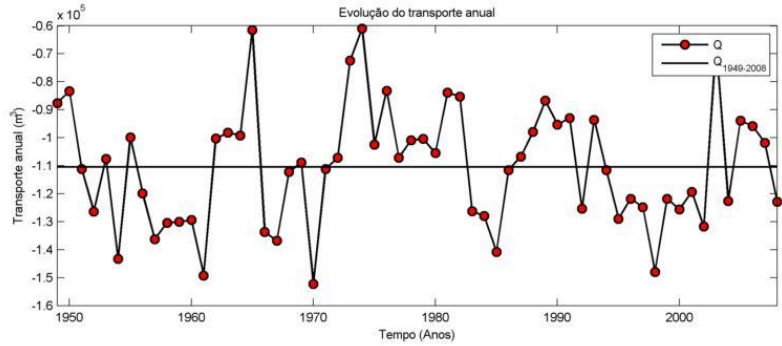
Observando os resultados percebe-se que o transporte de sedimentos na praia dos Ingleses é predominantemente para norte – nordeste, apesar de haver um menor transporte de sedimentos também para sul – sudeste, sendo que as maiores taxas transportadas encontram-se no setor 4, setor de grande exposição às ondas. Este setor, assim como já apresentado no setor 4 das praias da Barra da Lagoa – Moçambique é o setor que mais recebe sedimentos da praia dos Ingleses. Apesar de se perceber um acúmulo de sedimentos entre os setores 2 e 3, entre os setores 3 e 4 há um transporte muito maior se comparado aos outros setores.



**Figura 68 – Taxas médias anuais de transporte de sedimento para os 4 setores da praia dos Ingleses.**

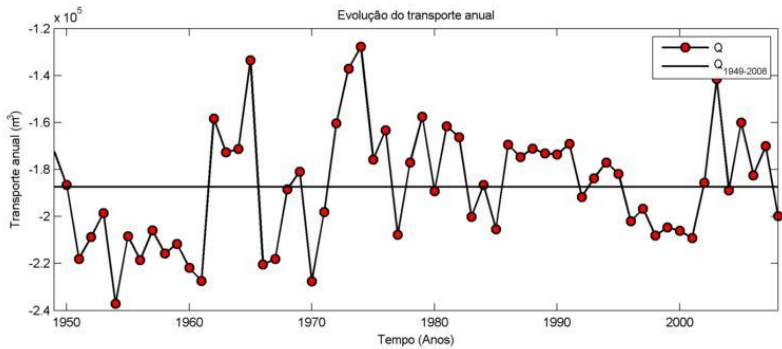
Já ao observar a evolução do transporte médio anual de sedimentos (Figuras 69 à 72), de forma geral, ele encontra-se variando em torno da média, porém essa média é negativa, indicando que há um contínuo transporte de sedimentos para norte - nordeste nesta praia (média de 170.145 m³/ano – ver Figura 68).

Evolução do Transporte Médio Anual de Sedimentos, Qm: Perfil Setor1-Ing



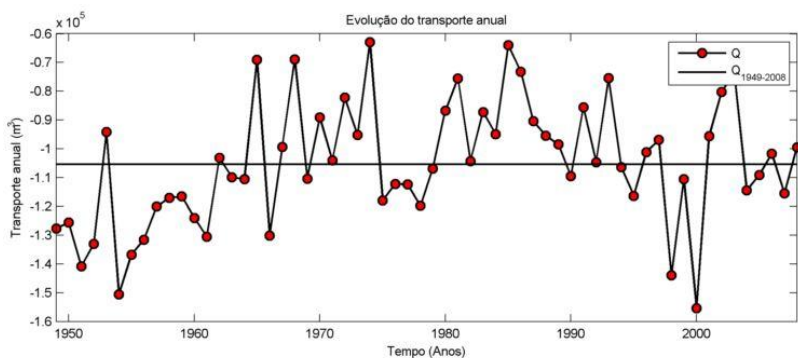
**Figura 69 - Evolução do transporte médio anual de sedimentos do setor 1 na praia dos Ingleses.**

Evolução do Transporte Médio Anual de Sedimentos, Qm: Perfil Setor2-Ing



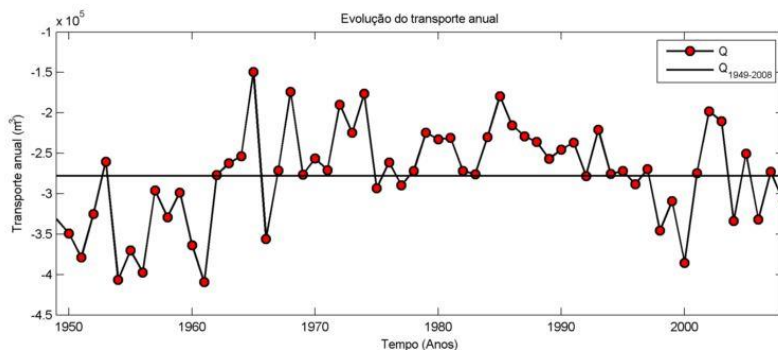
**Figura 70 - Evolução do transporte médio anual de sedimentos do setor 2 na praia dos Ingleses.**

## Evolução do Transporte Médio Anual de Sedimentos, Qm: Perfil Setor3-Ing



**Figura 71 - Evolução do transporte médio anual de sedimentos do setor 3 na praia dos Ingleses.**

## Evolução do Transporte Médio Anual de Sedimentos, Qm: Perfil Setor4-Ing



**Figura 72 - Evolução do transporte médio anual de sedimentos do setor 4 na praia dos Ingleses.**

### 5.3.4. Análise do perfil praial

O resultado das profundidades de fechamento calculadas para cada setor encontram - se na Tabela 11.



**Tabela 11 - Variáveis utilizadas e resultado do cálculo da profundidade de fechamento obtidos para as praias analisadas de acordo com Hallermeier (1981).**

Praia	Setor	$H_{s12}$ (m)	$\bar{H}_s$ (m)	$\sigma$ (m)	Prof. Fechamento (m)
Ingleses	1	1,07	0,46	0,09	3,16
	2	1,73	0,97	0,13	4,83
	3	1,94	1,20	0,14	5,39
	4	1,82	1,26	0,14	5,13

A partir das profundidades de fechamento calculadas, foram obtidos os perfis praias até tais profundidades. Observa-se que o setor 3 possui a maior profundidade de fechamento, porém ao analisar os resultados dos perfis na Figura 73, percebe-se que ambos os setores possuem perfis muito próximos, com exceção do setor 1 que possui a menor distância entre todos.

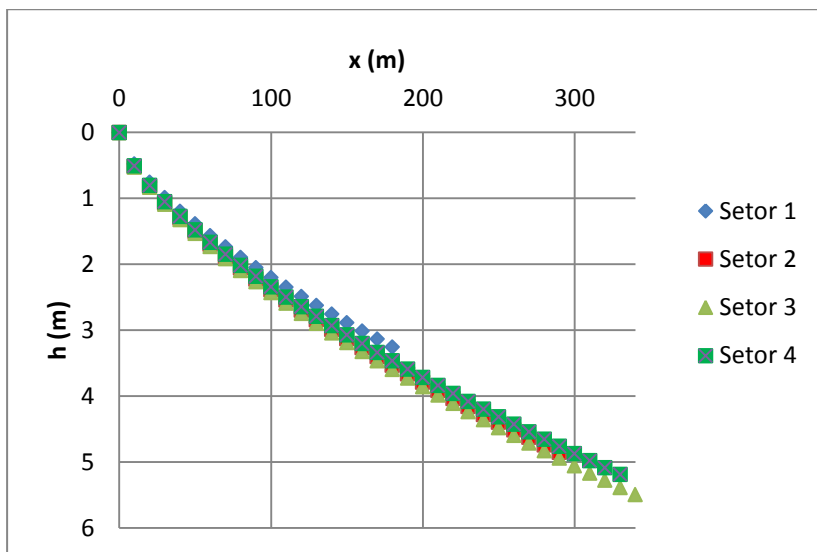
É importante ressaltar aqui que o parâmetro de escala de sedimentos (A) foi calculado, mas ao apresentar um valor ligeiramente menor que o da tabela proposta por Dean (ex: Setor 1 calculado 0,102 e teórico 0,109) optou-se por utilizar os valores teóricos propostos pelo autor para o cálculo do perfil de equilíbrio (Tabela 12).

**Tabela 12 - Tamanho de grão utilizado, parâmetro de escala de sedimentos A calculado e teórico.**

Praia	Setor	Tamanho médio de grão (mm)	Parâmetro A calculado	Parâmetro A teórico
Ingleses	1	0,22	0,102	0,106
	2	0,26	0,111	0,117
	3	0,27	0,113	0,119
	4	0,25	0,109	0,115

Sobre o tamanho médio de sedimento é possível observar que na praia dos Ingleses os valores apresentam uma variabilidade longitudinal na enseada, passando de areia fina na região sul (setor 1) para areia média no restante dos setores, com destaque aos maiores tamanhos de grãos no setor 3 da praia (ver Tabela 12).





**Figura 73 - Perfis de equilíbrio nos 4 setores da praia dos Ingleses.**

### 5.3.5. Análise da forma em planta

Os resultados de fluxo médio de energia direcional para o ponto de difração, assim como para os 4 setores que se dividem a praia dos Ingleses estão apresentados na Figura 74.

A forma em planta é então proposta na Figura 75. Nota-se pelo desenho que a forma em planta encontra-se em equilíbrio dinâmico, apresentando um retrocesso da ordem de 100 m na sua porção sul. A Figura 75 ilustra a zona da praia em equilíbrio dinâmico (hachurada em vermelho).

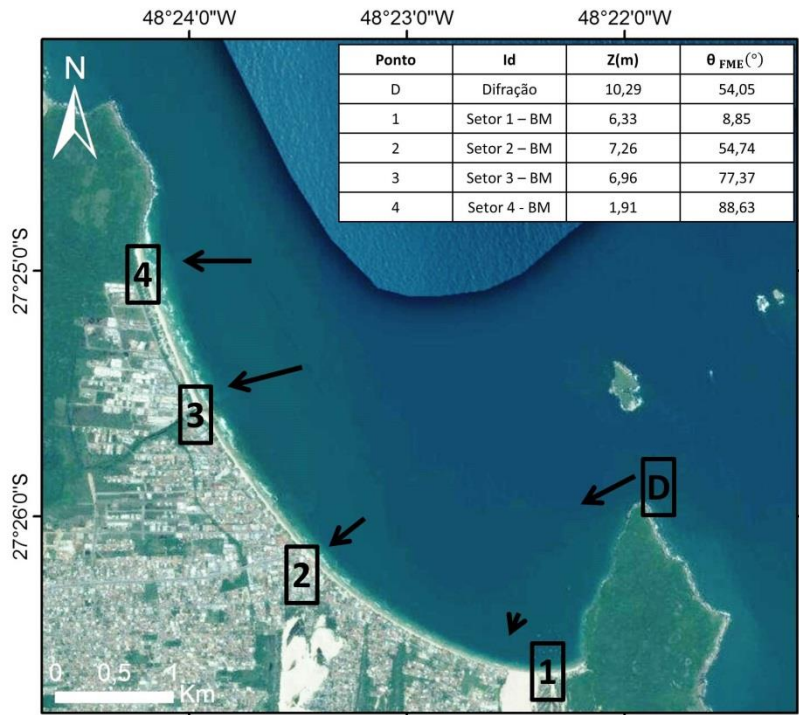


Figura 74 - Fluxo de energia direcional para o ponto de difração de onda e para os 4 setores da praia dos Ingleses.

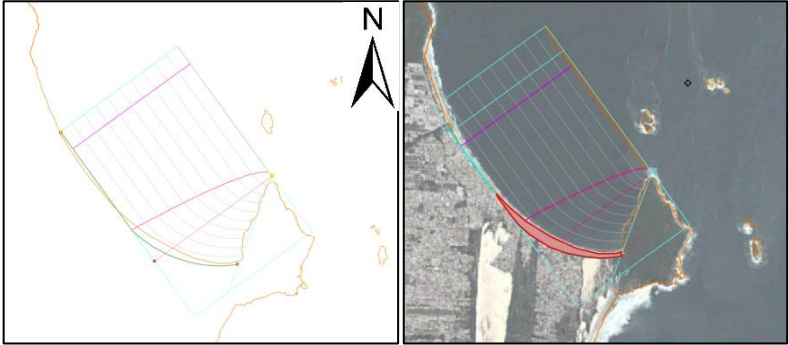


Figura 75 - Forma em planta da praia dos Ingleses conforme o fluxo médio de energia direcional e a equação de Hsu e Evans (1989). A área hachurada na segunda imagem identifica a área que está sofrendo erosão.

## 6. DISCUSSÕES

### 6.1. ANÁLISE DA VARIABILIDADE DO CLIMA DE ONDAS EM ÁGUAS PROFUNDAS

A partir das análises realizadas observa-se que as  $H_s$  e os  $T_p$  médios encontrados pelos dados de reanálise representam os dados medidos, sendo estes dados já anteriormente validados por GOMES da SILVA *et al.* (2015). As direções principais de ondas apontadas neste trabalho vêm do quadrante E – SE, sendo que dados de direções de ondas de N e NE são pouco significativas no ponto DOW selecionado. De acordo com Araujo *et al.* (2003) e posteriormente Franco e Melo Filho (2008), o clima de ondas ao longo da Ilha de Santa Catarina se apresenta tipicamente bimodal, com direção principal de ondas do quadrante SE – E e mares secundários de E – NE. Gomes da Silva *et al.* (2015) explica que a menor importância dos dados de nordeste nas séries de reanálise (quando comparada aos dados medidos) está relacionada à resolução dos ventos utilizados na geração das séries DOW (ventos da reanálise NCEP/NCAR I). No entanto, os autores também ressaltam o fato de este ser um problema típico de modelagem global/regional e que inclusive séries mais recentes de reanálise de vento e ondas apresentam estas mesmas limitações. Espejo *et al.* (2014) explica ainda que mares multimodais estão relacionados com a presença de ventos locais que geram vagas que nem sempre são resolvidas adequadamente pelo modelo de ondas WWIII, modelo gerador da base de dados GOW (entrada da base de dados DOW). Por fim, o mesmo padrão verificado por Signorin (2010), ao analisar de forma sazonal dados de ondas localizados em frente a praia da Joaquina, Florianópolis – SC, em que a autora demonstrou que as menores alturas de ondas se encontram na primavera e verão se comparadas as ondas de sul maiores e predominantes no outono e inverno, é encontrado neste trabalho.

A partir dos 60 anos de dados analisados neste trabalho, uma tendência de aumento de  $H_s$  pôde ser observada, com um aumento de 0,26 cm/ano em condições médias de ondas e 0,84 cm/ano em condições extremas ( $H_{s12}$ ). Valores semelhantes foram apresentados no relatório de CEPAL - ONU (2015) em que se projeta um aumento médio anual de 0,2cm/ano na costa catarinense. A tendência de 0,26 cm/ano resulta em um incremento de 0,16 m (16,10 cm) ao final de 60 anos. Valores maiores de aumento de  $H_{s12}$  médio também foram verificados por CEPAL – ONU (2015), no entanto em tal trabalho os valores de

tendência de  $H_{s12}$  encontrados para a zona de Santa Catarina ficaram ao redor de 1,1cm/ano, valor próximo ao encontrado neste trabalho (0,84 cm/ano). Ao considerar um incremento de 0,84 cm/ano pode-se esperar dentro de 60 anos um aumento nos valores médios anuais de  $H_{s12}$  de 0,5m.

Mesmo padrão de aumento gradual nos valores de  $H_s$  foi apontado por diversos outros autores (BACON; CARTER, 1991; ALAN; KOMAR, 2000; WOOLF *et al.*, 2002; YOUNG *et al.*, 2011) ao redor do globo, sendo que Young *et al.* (2011) também destaca que esse aumento é ainda maior quando se fala em dados de eventos extremos (e.g.  $H_{s12}$ ), corroborando com o que está descrito neste trabalho. Bacon e Carter (1991) e Allan e Komar (2000) para valores de  $H_s$  e Menéndez *et al.* (2008) para valores de  $H_{s12}$  encontraram no Pacífico norte valores maiores que os apresentados aqui (2,4, 2,7 e 4,0 cm/ano respectivamente). Já Harley *et al.* (2010) ao analisarem o Pacífico sul, encontraram valores próximos aos aqui apresentados (0,3 cm/ano) indicando que talvez essas tendências se comportam de forma diferente quando se fala em hemisfério sul e norte, mas similar dentro do mesmo hemisfério.

O mesmo pode ser observado para os valores de  $T_p$  médio anual e  $T_p$  associado a  $H_{s12}$ . Com um aumento de 0,0076 s/ano em condições médias e 0,0253 s/ano em condições extremas, ao longo de 60 anos, o aumento total destes dois parâmetros foi de 0,54s e 1,54s, respectivamente. Valores próximos foram encontrados por Dodet *et al.* (2010), sendo que os autores também encontraram um maior incremento de  $T_p$  associados às maiores  $H_s$  (de inverno).

Por fim, quanto a tendência na variação do fluxo de energia direcional, se verificou um aumento nos valores de direção de 0,1533 °/ano, ou seja, uma tendência de rotação na direção de fluxo médio de energia para Sul. O mesmo padrão foi verificado em CEPAL – ONU (2015). De acordo com os autores, a costa do Brasil tem sofrido uma rotação positiva na direção do fluxo médio de energia e apresentam valores de tendência próximos aos encontrados no presente trabalho (0,1688 °/ano) para a costa catarinense. Assumindo a tendência de incremento encontrada neste trabalho, de 0,1533 °/ano, conclui-se que em 60 anos a rotação no fluxo de energia direcional foi de 9,35°. Harley *et al.* (2010) também encontraram um aumento na direção média ( $\theta_m$ ) de 0,2°/ano em direção Sul durante um período de 45 anos (1957-2002). Já para o Atlântico Norte, Dodet *et al.* (2010) ao analisar dados direcionais encontraram a mesma tendência das ondas estarem girando no sentido sul. Estes resultados podem indicar uma mudança global padrão, que

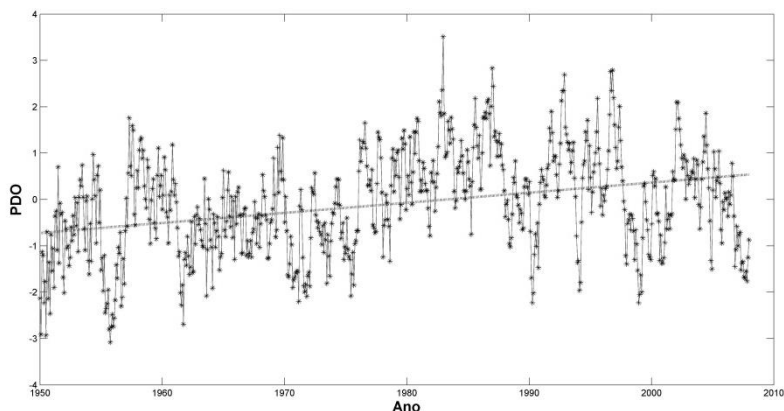
pode estar relacionada a mudanças nos padrões de ventos nas zonas de gerações de ondas.

Entender a variabilidade da altura das ondas, período e direção é necessário para muitos estudos de engenharia costeira e oceânica. Compreender as mudanças no clima de ondas é crítico para determinar as diretrizes de segurança durante as fases de pré-concepção de projetos costeiros e análise preliminar de perigos. Na verdade, uma prática usual em estudos de engenharia é calcular parâmetros estatísticos com base em dados de onda disponíveis nos períodos de tempo muitas vezes demasiado curtos para representar um regime de onda extremo, por exemplo, onde os registros de longo prazo são necessários (DODET *et al.*, 2010). Além disso, a partir das pesquisas recentes que indicam cenários de mudança climática, onde a intensidade das alturas de onda e frequência das faixas de tempestade estão subindo (IPCC, 2012; CEPAL-ONU, 2015), fazem com que uma boa avaliação da variabilidade desses dados em longo prazo seja ainda mais necessária, visto que estas mudanças tem grande efeito nos processos de erosão e acreção de praias, uma vez que a direção do fluxo médio de energia é o principal fator determinante da forma em planta de equilíbrio e do transporte de sedimento pela quebra.

### **6.1.1. Correlação com índices climáticos**

A partir da correlação de 3 diferentes índices climáticos, PDO, MEI e AAO, com pelo menos uma variável de ondas, os resultados demonstram que estes índices possuem algum tipo de influência sobre os dados de ondas que chegam a costa da ilha de Santa Catarina, mesmo que não sejam os únicos fatores que explicam estes processos de acordo com os valores encontrados na Tabela 8. Para tentar explicar esses dados, estes foram primeiramente plotados de forma a observar se possuem alguma tendência e, dentre todos, o PDO demonstrou maior correspondência ao que se vem observando até o momento (Figura 76). Este índice apresentou, assim como as análises anteriores, um aumento na tendência da série de dados, onde até 1976 o PDO está em sua fase negativa, já partir de 1977 a sua fase positiva está em evidência (MANTUA; HARE, 2002) até o ano 2000, onde ele volta a ficar na fase negativa. Esta divisão dos dados em 3 fases é correspondente a divisão dos dados de Hs, onde a partir de 1972 há também um aumento na Hs, mas a partir dos anos 2000 esse aumento é ainda mais evidente (ver Figura 38). Ainda Campos (2009) ao relacionar a PDO com eventos gerados por ciclones demonstra uma correlação positiva entre ambos, ou

seja, o número de ciclones é maior em fases positivas da PDO (fases onde a água do Pacífico leste é mais quente – El Niño).



**Figura 76 – Análise de tendência linear para dados mensais de PDO.**

Campos (2009) ao investigar a relação de AAO, MEI e PDO com eventos extremos na Bacia de Campos, encontrou correlação entre ambas as variáveis, com destaque a AAO, o qual é responsável pelo aumento da ocorrência e das alturas de ondulações geradas por ciclones e anticiclones. O autor ainda credita um sutil crescimento no número de ondulações geradas por ciclones ao El Niño, porém com uma diminuição na incidência de extremos, o inverso ocorre em períodos de La Niña, onde os ciclones são menos frequentes mas geram maiores Hs.

Na Austrália, Harley *et al.* (2010) investigaram a variabilidade interanual através da comparação dos dados do ERA-40 com dados de anomalias da pressão média do nível do mar do SOI e da AAO. Em um esforço para explicar a evolução morfodinâmica na região de Sydney - AUS, estes autores descobriram, em escala de tempo anual, que as alturas de ondas apesar de aumentarem/diminuírem durante as fases de La Niña/El Niño respectivamente assim como no Atlântico Sul, no Pacífico as ondas chegavam mais de leste/sul, o contrário do descrito aqui. O mesmo padrão foi encontrado por Hemmer *et al.* (2010) e Laing (2000), no oeste do Pacífico tropical.

Pereira e Klumb-Oliveira (2015) ao analisar dados de ondas do modelo WWIII com anos de acentuada ocorrência de eventos de El Niño e La Niña encontraram uma tendência de diminuição de  $H_s$  em

anos de El Niño e o inverso em anos de La Niña, o mesmo padrão encontrado por Campos (2009) e Harley *et al.* (2010). Dessa forma, decidiu-se neste trabalho também analisar os maiores eventos de La Niña e El Niño de forma individual com as variáveis de ondas.

Os resultados encontrados desta análise podem ser observados na Tabela 13:

**Tabela 13 - Valores de correlação entre as variáveis do clima de ondas e os períodos mais fortes de El Niño e La Niña. Valores em vermelho representam significância da correlação. Quanto mais próximo de zero menor a correlação. Nível de significância das correlações de 95%.**

	FE	FEDir
El Niño 82-83	-0,362034	-0,679918
El Niño 97-98	-0,540354	-0,673688
La Niña 75-76	0,141909	0,541027
La Niña 99-00	0,376386	0,808862

A partir destas análises pode-se aferir que eventos de El Niño possuem correlação inversa com dados de FE Direcional, ou seja, quanto mais quente a água do mar (anos de El Niño), menores os valores de direção (mais de leste) e também menor o FE. O oposto acontece em anos de La Niña. Estes resultados corroboram com as análises anteriores, pois são nos meses de verão que chegam a costa maiores ocorrências de ondas de leste, e também menores valores de Hs. Ainda de acordo com Pereira e Klumb-Oliveira (2015) essa redução na altura significativa das ondas pode ser atribuída à intensificação da Alta Subtropical do Atlântico Sul e consequentemente ao aumento na ocorrência de jatos subtropicais nos períodos de El Niño, visto que esta alteração meteorológica causa o bloqueio de frentes frias na região Sul do Brasil e assim redução da porcentagem de ondas do quadrante sul.

Estudos de Bacon e Carter (1993), Bauer (2001), Woolf *et al.* (2002) e Dodet *et al.* (2010) no hemisfério norte, também apresentam padrões relacionados entre os parâmetros de ondas e índice NAO, por exemplo. Todos estes estudos acabam por incitar um interesse significativo em compreender transformações no clima de ondas como uma resposta a mudanças na circulação zonal na atmosfera, especialmente quando tais mudanças climáticas estão ligadas aos impactos sociais e econômicos (HARLEY *et al.*, 2010).

## 6.2. BARRA DA LAGOA – MOÇAMBIQUE

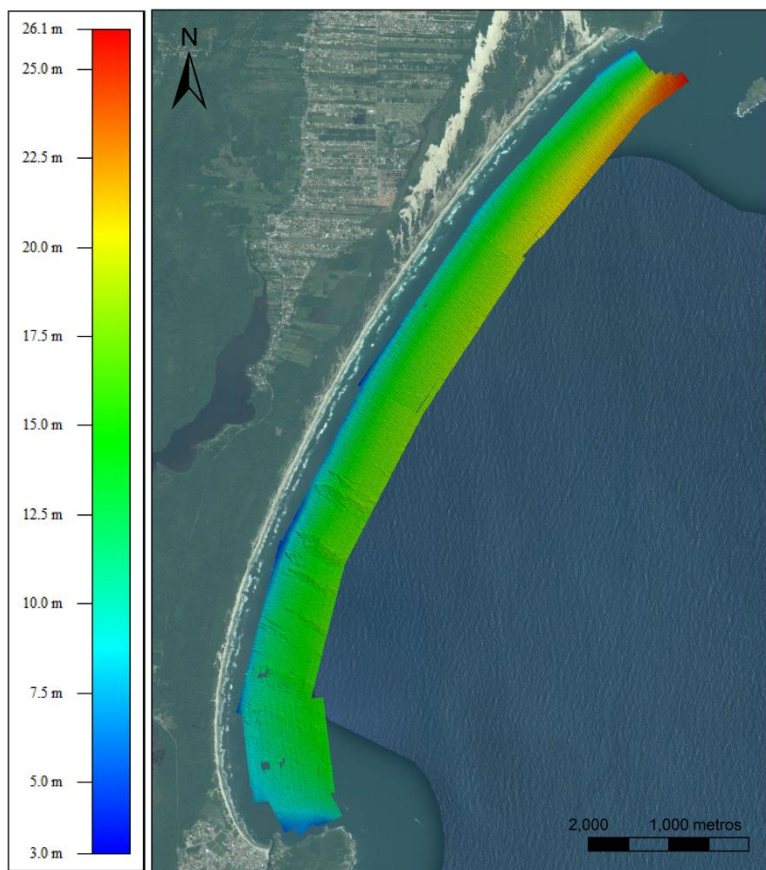
### 6.2.1. Transporte de sedimentos litorâneo

As taxas de transporte de sedimentos líquido nas praias da Barra da Lagoa – Moçambique possuem uma direção predominante de sul para o norte, devido a direção de predomínio do clima de ondas. A maior taxa de transporte de sedimento no setor 4 esta associada à exposição deste setor às ondas, como esperado, recebendo mesmo próximo à costa valores altos de  $H_s$ . A média de  $H_s$  nesse setor é de 1,51m, com  $H_s$  máximo chegando a 4 m. Esses valores são próximos às alturas significativas encontradas no ponto DOW localizado *offshore* (média 1,76m), indicando assim que não há nenhum obstáculo que faça as ondas provindas de sudeste (maiores e mais frequentes) diminuir significativamente de tamanho, mesmo a refração. Neste setor a onda sente o fundo mais próximo da costa pela região da antepraia ser mais profunda se comparado com os outros setores próximo ao promontório que possuem uma área mais rasa (Figura 77).

Resultados de transporte de sedimentos encontrados por Miot da Silva *et al.* (2012) utilizando a fórmula do CERC nas mesmas praias, demonstram que a maior taxa de transporte de sedimentos também foi encontrada na região norte da enseada, e que o transporte de sul para norte é predominante em eventos de alta energia de ondas provindos de direção sudeste. Os autores também afirmam que com condições de mar de baixa energia com ondas provindas de leste – nordeste, este padrão se inverte onde o transporte de sedimentos é de norte para sul, porém de menor magnitude. Os mesmos resultados de direção de transporte foram encontrados nesse trabalho, assim como em magnitude. Miot da Silva *et al.* (2012) ao aplicar a equação do CERC para diferentes casos de ondas encontraram taxas de transporte de sedimento da ordem de 9.000 m<sup>3</sup>/ano até 900.000 m<sup>3</sup>/ano. Os resultados encontrados no presente trabalho ainda corroboram com as taxas de transporte de sedimentos encontrados por Almeida (2013) ao aplicar o mesmo modelo para a praia de Piçarras (variação de 149.704 m<sup>3</sup>/ano na parte abrigada à 411.551 na parte exposta) a qual é mais abrigada das ondas do quadrante SE se comparadas à Barra da Lagoa – Moçambique e; por Abreu (2011) na praia Grande em São Francisco do Sul (200.000 - 500.000 m<sup>3</sup>/ano).



## Batimetria da Praia da Barra da Lagoa e Moçambique

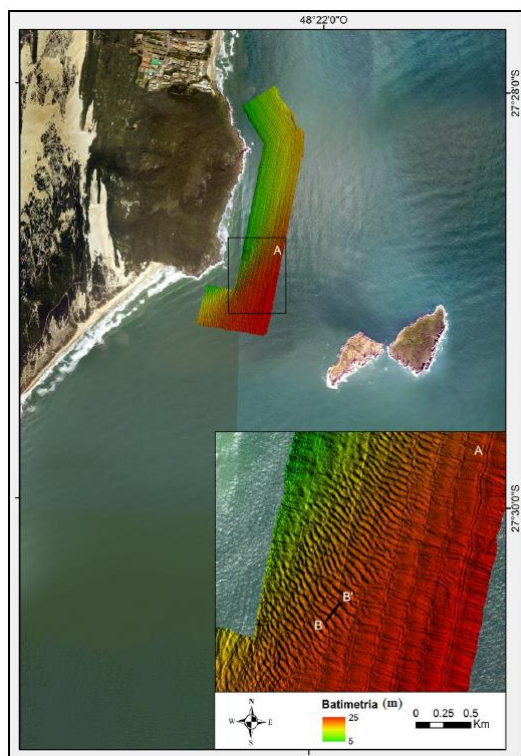


**Figura 77 - Mapa batimétrico das praias da Barra da Lagoa e Moçambique. Fonte: Klein *et al.* (2016).**

Vieira da Silva *et al.* (2016a) na região do setor 4 verificou que há um acúmulo de sedimentos, sendo este perceptível na evolução da linha de costa. Estes autores ao perceberem este acúmulo de sedimentos na região norte da enseada analisaram a batimetria em frente a este setor concluindo que devido a forma côncava e convexa do perfil, há também

um acúmulo de sedimentos em frente a Ponta das Aranhas. Esse acúmulo de sedimentos fornece areia para a enseada adjacente. Tendo isto em mente e através do cálculo da profundidade de fechamento próximo a Ponta das Aranhas ser maior que a profundidade do promontório em direção ao mar, pode-se dizer que está ocorrendo *bypassing* a norte da enseada.

A profundidade de fechamento encontrada no setor 4 das praias Barra da Lagoa - Moçambique é de 6,07 m, já a profundidade próxima ao promontório é por volta dos 5 m (Figura 78). Dados de *bypassing*, podem ainda ser confirmados pelas megaondulações migrando para norte encontradas neste local por Porpilho *et al.* (2015) e por uma forte indicação de que as praias da Barra da Lagoa – Moçambique estão passando por um processo de rotação praial com acúmulo de sedimentos ao norte segundo Vieira da Silva *et al.* (2016a).



**Figura 78 - Batimetria de detalhe no promontório da Ponta das Aranhas.**  
**Fonte: Porpilho (2015).**

Por fim Miot da Silva *et al.* (2012) ainda encontraram, de forma geral, que a enseada da Barra da Lagoa – Moçambique está com um balanço de sedimentos negativo, ou seja, ela está sofrendo com mais perda que aporte de sedimentos nestas praias. Sendo que o transporte de sedimentos em direção ao sul, em menor volume, é importante em parte da manutenção da enseada, visto que a mesma perde muito sedimento da praia para duna adjacente (MIOT DA SILVA; HESP, 2010; PINTO, 2015).

Ao observar a evolução do transporte médio anual de sedimentos (ver Figuras 52 – 55) nota-se que, com exceção do setor 1, mais protegido à exposição às ondas, nos outros 3 setores há um aumento gradual no transporte de sedimentos a cada ano que passa principalmente a partir dos anos 1970 onde verifica-se um aumento na altura de onda (ver Figura 38), intensificando-se o transporte em direção norte. O setor 1, ao contrário, diminui o transporte de sedimentos, o que pode ser explicado pela rotação do clima de ondas e consequentemente maior proteção do setor 1 frente a chegada das ondas.

Por outro lado, Porpilho *et al.* (2015), utilizando os dados de um ADCP fundeado a 21,8m de profundidade, nessa região, identificaram a presença de correntes bimodais mais frequente para sul, mas com menores magnitudes, e correntes para o norte, onde estas acabaram se sobressaindo pelas maiores magnitudes, chegando a 0,6 m/s próximo aos leito. Dessa forma pode-se afirmar que tanto com ondas na zona de surfe como com correntes na antepraia, de uma forma geral, o transporte de sedimentos na enseada acontece de sul para o norte.

### **6.2.2. Análise da estabilidade das praias da Barra da Lagoa - Moçambique em planta e perfil**

Observando os perfis calculados para estas praias pode-se dizer que estes cumprem com as premissas básicas do perfil de equilíbrio de Dean, pois os mesmos são côncavos para cima e nos perfis com a declividade mais gradual o tamanho de sedimento é menor. O setor com o maior tamanho de grãos (setor 3) tem o perfil mais íngreme se comparado com o setor que possui o menor tamanhos de grão (setor 1). Da mesma forma, os setores mais expostos à ação das ondas (setores 2, 3 e 4) tem um perfil ativo maior que os setores localizados abrigados da ação das ondas (setor 1). Este comportamento é o mesmo encontrado por González (1995), o qual afirma que enseadas abrigadas por promontórios sofrem alterações no limite da ação das ondas sobre o

transporte sedimentar do perfil, ou seja, quanto mais abrigado o perfil da ação das ondas, menor será a profundidade de fechamento do mesmo.

Agora, ao levarmos em consideração o aumento na  $H_s$  e um aumento ainda maior nas  $H_{s12}$  e na frequência destas, o perfil praiial de equilíbrio poderá não ter tempo hábil para se recuperar frente a ações de tempestade futuras, perdendo sua condição de equilíbrio. Segundo Fucella e Dolan (1996), a maior parte da erosão do perfil praiial ocorre nas primeiras 6 horas de uma tempestade e que aproximadamente 50% da perda é ainda recuperada nas primeiras 12 horas após a tempestade. Com a não recuperação total do perfil, como descrito pelos autores, em pouco tempo eventos sucessivos com maiores alturas de ondas ocorrendo em um curto espaço de tempo, podem causar problemas ainda maiores ao passo de que podem erodir ainda mais a porção subaérea da praia, agravando os problemas de erosão que já acometem esse local.

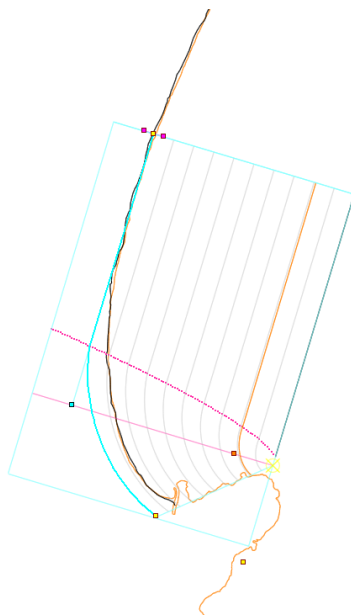
Também com um aumento da  $H_{s12}$ , ocorre um aumento na profundidade de fechamento, fazendo com que os limites laterais da praia continuem não sendo capazes de manter a praia contida nestes. Nesta situação, além da perda de sedimento pela parte submersa do perfil, esta perda poderá implicar em uma retração da linha de costa. Dado que nesta situação, a forma do perfil original da praia continue se mantendo, assume-se que a forma do perfil depende do tamanho médio do grão que não muda, portanto, o perfil responde deslocando-se terra adentro.

O mesmo agravante poderá ser notado na variabilidade sazonal do perfil. Diversos autores já descreveram que durante a estação de inverno ocorre erosão na parte emersa da praia e acúmulo na submersa, enquanto o oposto é verdadeiro para o verão nestas praias (CRUZ 1993, 1998; FARACO 1998, 2003; LEAL, 1999). Com um maior aumento de frequência de  $H_s$  com tendências erosivas (outono/inverno) o perfil praiial também poderá não se recuperar.

Neste trabalho foi encontrado para as praias da Barra da Lagoa – Moçambique um estado praiial em equilíbrio dinâmico, pois a enseada ainda não se estabilizou frente as direções de fluxo de energia de ondas que chegam no local. Este mesmo resultado foi encontrado por Silveira *et al.* (2010) ao analisar estas praias através de imagens de satélites e aplicando a ferramenta MEPBAY. Segundo Leal (1999); Miot da Silva (2006), Klein *et al.* (2016) e Vieira da Silva *et al.* (2016a) esta enseada encontra-se com tendência erosiva próximo a região conhecida como Camping da Barra. O mesmo local já foi estudado por Schweitzer (2013) e Dalinghaus *et al.* (2015) sendo apontadas evidências de erosão neste trecho, o qual pode estar sendo influenciado também por uma

corrente de retorno que acontece neste local quando as ondas chegam do quadrante S – SE (ver Figura 49), fazendo com que não haja aporte de sedimentos no local.

Por fim, ao considerar que o fluxo médio de energia *offshore* sofrerá alteração de  $9,35^\circ$  para direção Sul nos próximos 60 anos conforme item 5.1, pode-se supor também que essa mesma alteração se dará próximo ao ponto de difração. Caso isto ocorra, espera-se que a forma em planta da praia ao final deste período seja algo semelhante ao apresentado na Figura 79. Nesta figura se observa ainda mais erosão no setor sul, conforme o fluxo de energia é alterado e a praia for se ajustando a esta mudança.



**Figura 79 - Forma em planta futura das praias da Barra da Lagoa - Moçambique (próximos 60 anos).**

Tessler (2010) analisou a influência do promontório da Ponta da Penha, na enseada do Itapocorói, sobre diferentes alturas e direções de ondas que chegavam na enseada. Este autor demonstrou que ondas com  $H_s$  médios e mínimos apresentavam um mesmo padrão de comportamento dentro da enseada numa variação de direção de até  $30^\circ$  e padrões próximos com maiores amplitudes de direções. A única exceção foram as ondas extremas do quadrante S, que mesmo após sofrerem o

processo de difração, próximo ao promontório, conseguem entrar na enseada com a mesma  $H_s$  que ondas do quadrante E – NE. Isto pode indicar uma contínua influência dos marulhos de S dentro da enseada da Barra da Lagoa – Moçambique, apesar da mudança da direção de ondas *offshore*.

Além de mudanças na posição da linha de costa, também uma mudança na direção do clima de ondas transcorreria no fenômeno de rotação praial. Ondas de uma determinada direção induzem um transporte longitudinal que leva os sedimentos a acumularem na extremidade oposta da praia, uma inversão da direção do clima de ondas poderia alterar esse padrão.

### 6.3. INGLESES

#### 6.3.1. Transporte de sedimentos

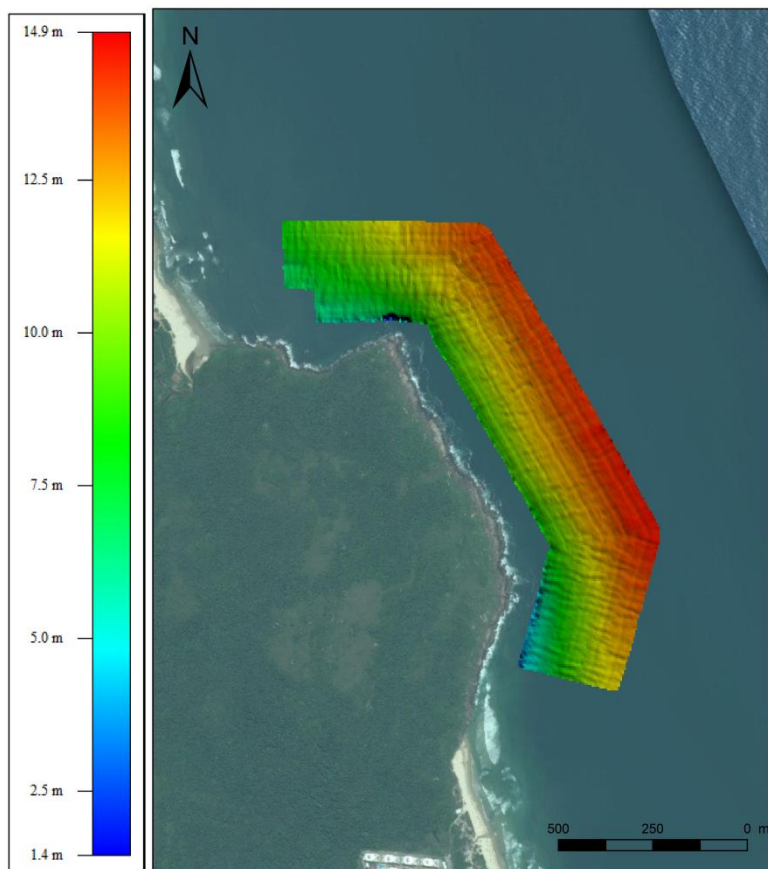
O transporte longitudinal de sedimentos da praia dos Ingleses apresenta, de forma geral, um padrão bastante semelhante às praias da Barra da Lagoa – Moçambique ao apresentar um transporte de sedimentos de sul para norte, com maiores taxas de variação encontradas no setor 4. Porém nos Ingleses o transporte líquido anual de 170.145 m<sup>3</sup>/ano é bem menor se comparado às praias da Barra da Lagoa – Moçambique (600.766,95 m<sup>3</sup>/ano). Apesar disso esta taxa está de acordo com valores encontrados por Almeida (2013) em Piçarras de até 170.000 m<sup>3</sup>/ano em sua porção mais abrigada e Abreu (2011) na Praia da Saudade em São Francisco do Sul (até 200.00 m<sup>3</sup>/ano). O setor 4 possui as maiores taxas de transporte de sedimento por estar localizado na área de maior exposição às ondas proveniente de leste, maiores ondas que chegam nesta enseada (ver Figura 67). Analisando a Figura 68 percebe-se que o valor de transporte positivo (para sul) no setor 1 é o menor de todos os setores (6520 m<sup>3</sup>/ano) especialmente se comparado ao transporte negativo (para norte) deste mesmo setor (187.262,36 m<sup>3</sup>/ano). Isso se dá pela proteção que esse setor recebe da Ponta dos Ingleses e das ilhas no entorno, fazendo com que mais saia do que chegue sedimento neste setor. Apesar disso este setor recebe sedimento através do *overpassing* pelas dunas do Santinho que chegam à praia (BOYENGA *et al.*, 2010; PINTO, 2015).

A evolução do transporte médio anual por outro lado, não apresenta um padrão marcado, com exceção de que o transporte médio líquido para todos os setores é para norte (ver Figuras 69 – 72). Os

setores 3 e 4 porém apresentaram uma diminuição no transporte de sedimentos entre as décadas de 70 e 90, justamente quando ocorreram as maiores taxas de aumento de  $H_s$  (0,84 cm/ano). Sabendo que maiores  $H_s$  são relacionadas às ondas de Sul, isto indica que apesar de maiores  $H_s$  transportarem mais sedimentos, neste caso, tais ondas não chegam efetivamente a enseada, fazendo com que, possivelmente, não haja também alteração na forma em planta nos próximos 60 anos nesta praia.

Mais uma vez, ao calcular a profundidade de fechamento no setor 4 e compará-la com a profundidade em volta da Ponta da Feiticeira percebe-se que a primeira é mais profunda em direção ao mar. Com uma profundidade de fechamento de 5,13 m neste setor comparado a batimetria encontrada na região (Figura 80), pode-se mais uma vez afirmar que ocorre o processo de *bypassing* nesta região. Este processo de *bypassing* é também apontado por Vieira da Silva *et al.* (2016b), onde a partir de modelagem numérica e testes com armadilhas de sedimento no local, os autores definem que há transporte de sedimento sentido SE – NO na praia dos Ingleses e que, apesar de uma parte deste sedimento voltar para os Ingleses quando chega na Ponta da Feiticeira, a maior parte segue para a praia Brava.

Ao analisar ainda as correntes presentes na zona de estudo, pode-se concluir que estas não são tão expressivas na região de acordo com a menor altura de ondas que chega na enseada, fazendo com que as menores taxas de sedimentos transportados através da quebra da onda sejam condizentes com a dinâmica praial dos Ingleses se comparadas ao ambiente mais exposto encontrado na Barra da Lagoa.



**Figura 80 - Batimetria de detalhe no costão entre as praias dos Ingleses e a Brava. Fonte: Klein *et al.* (2016).**

### **6.3.2. Análise da estabilidade da praia dos ingleses em planta e perfil**

É importante ressaltar que na formulação de Dean (1977) a forma do perfil depende única e exclusivamente do tamanho de sedimento através do parâmetro  $A$ , sendo que a altura de onda indica a cota final do perfil,  $h_*$  (profundidade de fechamento). Desta forma, apesar de diferentes profundidades de fechamento serem calculadas nos 4 setores da praia, o tamanho de grão entre eles é semelhante, fazendo com que os 4 perfis fiquem muito próximos uns dos outros. Ainda, ao considerar um



m fixo, como proposto por Brunn (1954, *apud* Dean 1991) significa considerar que os perfis com a mesma granulometria terão exatamente a mesma forma (GRUBER, 2002). Porém ao analisarmos os dados dos perfis subaéreos medidos por Klein *et al.* (2016), o mesmo não ocorre, já que são verificadas variações na declividade dos perfis analisados.

O perfil praial nesta praia não sofrerá diretamente pelo aumento do  $H_{s12}$ , conforme discutido anteriormente, porém em períodos de El Niño, esta praia tem sofrido mais com eventos erosivos, segundo Faraco *et al.* (2006), devido ao aumento da intensidade dos jatos subtropicais. Estes resultam no bloqueio dos sistemas frontais que chegam à costa, favorecendo a formação de marulho de leste que originam ondas de tempestade na região, causam impactos erosivos nos perfis praias. Diferentemente dos períodos de La Niña, onde os marulhos de sul são dominantes. Neste caso, a praia dos Ingleses é menos afetada por ser menos exposta à ondas dessa direção por causa do formato da praia e da orientação para norte.

Através da utilização da equação de Hsu e Evans (1989) modificada por González e Medina (2001) pôde-se concluir que a praia dos Ingleses encontra-se em situação de equilíbrio dinâmico por possuir um trecho da praia ainda não ajustado ao clima de ondas incidente. Este mesmo resultado foi encontrado por Boyenga *et al.* (2010) ao utilizar diferentes modelos de cálculo de forma em planta e por Silveira *et al.* (2010). Estes autores afirmam que a praia dos Ingleses, apesar de estar próxima de um estado de equilíbrio estático, apresenta características de uma enseada em equilíbrio dinâmico, com o aporte de sedimentos das dunas do Santinho, como principal fonte de entrada de sedimentos na enseada. Boyenga *et al.* (2010) e Pinto (2015) ainda pontuam que o balanço de sedimentos encontrado nesta região é negativo, pois encontra-se parcialmente interrompido pela vegetação que tem aumentado e estabilizado o campo de dunas desde a década de 1980.

De acordo com o ponto de difração adotado na Ponta dos Ingleses, o modelo demonstra que a praia tem buscado o ajuste de acordo com o clima de ondas e o volume de sedimentos disponível na região, porém a urbanização existente na região pode influenciar no aumento de erosão no local pois fixa o ajuste da linha de costa de acordo com a parábola. Abreu de Castilhos (1995), Gomes da Silva (2014) e Vieira da Silva *et al.* (2016a) ao estudar a enseada dos Ingleses também identificaram um comportamento de retração na linha de costa, especialmente no setor sul da enseada, devido ao menor aporte de sedimentos que tem chegado a enseada e ao aumento da urbanização.

Por fim Muler (2012) e Gomes da Silva (2014) identificaram essa enseada como sendo de grande vulnerabilidade aos perigos naturais, estando a mesma sujeita a ação das ondas de tempestade e consequentemente inundação costeira.

É importante destacar que a região de maior retrocesso da forma em planta contrastada com a forma atual de ambas as praias (Barra da Lagoa – Moçambique e Ingleses) é a região onde estão concentrados os processos de erosão das mesmas (ABREU DE CASTILHOS, 1995; FARACO, 2003; SCHWEITZER, 2013; DALINGHAUS *et al.*, 2015; VIEIRA DA SILVA *et al.*, 2016a), mostrando que ambos os trechos da costa ainda não encontraram estabilidade frente ao clima de ondas que as atinge.

## 7. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo analisar a estabilidade das praias da Barra da Lagoa – Moçambique e Ingleses através da utilização de modelagem numérica, diante do conhecimento prévio do clima de ondas local e do transporte litorâneo. A partir da análise dos resultados e discussões pode-se concluir que:

- Foram verificadas tendências de aumento nos parâmetros de ondas  $H_s$ ,  $T_p$  e  $\theta$ , com um aumento de 16,10 cm, 0,47 s e 9,35° respectivamente, nos 60 anos de dados analisados, demonstrando um aumento no número de eventos extremos com o clima de ondas chegando mais de direções sul com o passar dos anos;
- A partir da análise de correlação linear dos parâmetros de ondas FE, FEDir,  $H_s$ ,  $T_p$  e  $H_{s12}$  com diferentes índices climáticos, 3 (AAO, PDO e MEI) apresentaram algum nível de correlação, demonstrando influência, mesmo que baixa, na explicação do comportamento das ondas na região, como a influência do el Niño em ondas providas de direção leste e a la Niña em ondas providas de direção sul;
- O transporte longitudinal tanto nas praias da Barra da Lagoa – Moçambique, quanto na praia dos Ingleses apresentou uma direção predominante para norte em todos os anos analisados, com os setores mais expostos à frente de ondas sendo aqueles em que a taxa de transporte litorâneo era maior. Ambas as praias mostraram-se com um acúmulo de sedimentos na sua porção norte;
- A profundidade de fechamento encontrada nos setores mais ao norte das praias se apresentaram maiores que as profundidades dos costões, indicando que há *bypassing* de sedimentos ocorrendo entre enseadas;
- A análise do perfil praial e da forma em planta de ambas as praias demonstraram situações de equilíbrio dinâmico, com uma região de erosão em ambas as praias causada pelo ajuste da linha de costa atual frente ao clima de ondas e pela baixa concentração de sedimentos que têm permanecido nas enseadas. Visto que ondas com maiores  $H_s$  e com tendência a causar maior remobilização dos sedimentos têm chegado com mais frequência e mais intensidade, mais rápido ocorrerão as respostas no transporte de sedimentos líquido e

consequentemente na variação da morfologia do perfil e da forma em planta nas enseadas.

### 7.1. LIMITAÇÕES DESTE TRABALHO

- Apesar da utilização de reanálises numéricas de ondas ser uma opção viável quando se tem a intenção de se obter dados dispersos homogeneamente no tempo e espaço, tem-se que ter claro que estes são dados modelados e não propriamente medidos;
- A utilização dos dados DOW anteriormente validados (GOMES DA SILVA, 2014; GOMES DA SILVA *et al.*, 2015) se mostrou eficaz para o proposto, porém a sua limitação em demonstrar mares secundários (vagas), importantes para a região de estudo, faz com que os resultados deste trabalho sejam interpretados de forma cuidadosa, e como análise inicial do ambiente;
- Devido a limitação na inserção de dados de entrada nos modelos e no processo de modelagem em si alguns processos reais de menor escala podem ser mascarados pela resultados mais frequentes;
- Não havia dados de ondas medidos em águas rasas na área de estudo e por esse motivo a validação do modelo de ondas não foi realizado. Ainda assim, a calibração do modelo OLUCA em uma praia no norte do estado (OLIVEIRA, 2013) mostrou sua eficiência em simular as transformações de ondas na costa catarinense;
- Tanto o cálculo do transporte de sedimentos pela equação do CERC (1984), como o perfil praiar de equilíbrio de Dean e a forma em planta de Hsu e Evans (1989) modificada por González e Medina (2001) levam em consideração apenas algumas variáveis no seu cálculo (anteriormente citadas). Sabendo que a praia é um ambiente dinâmico, em constante mudança, sabe-se que muitos outros fatores podem influenciar esta;

- Para o cálculo da forma em planta, a subjetividade na escolha do ponto de difração de acordo com cada observador pode trazer resultados diferentes para o mesmo local;
- De forma geral a base do trabalho se deu analisando os dados de ondas, tanto para o cálculo do perfil praias, forma em planta e transporte de sedimentos. Assumiu-se que somente as ondas tem mudado, mas há outros fatores que também variam, como o nível do mar (aceleração IPCC), aporte de sedimentos, entre outros.

## 7.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir das conclusões obtidas neste trabalho e também das limitações presentes, algumas recomendações são listadas para que haja continuidade e/ou aperfeiçoamento deste estudo:

- Utilização de dados de vento de reanálise mais recentes para o cálculo do clima de ondas, reanálises que representem bem mares bimodais, e assim realizar uma nova caracterização do clima de ondas local;
- Validação do modelo de ondas com dados medidos *in situ*;
- Recomenda-se comparar perfis praias de equilíbrio calculados com perfis medidos, de forma a ajustar a equação de Dean na área de estudo;
- Recomenda-se incluir outros fatores que também tem variado com o passar do tempo, como o nível do mar (aceleração IPCC), aporte de sedimentos, entre outros, para análise da evolução da praia de uma forma geral.



## REFERÊNCIAS

- AAGAARD, T.; MASSELINK, G. The Surf Zone. In: SHORT, A. D. (Ed.). **Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics**. New York: John Wiley & Sons, 1999 p.230-250.
- ABREU DE CASTILHOS, J.; KLINGEBIEL, A. ; GRÉ, J.C.R. Les plages de l'île de Santa Catarina (Brésil): um système sédimentaire évolutif et précaire. In: COASTAL CHANGE 95, 1995, Bordeaux. **Proceedings...** Bordeaux: UNESCO, 1995. p.1-3.
- ABREU, J.J. Transporte sedimentar longitudinal e morfodinâmica praial: exemplo do litoral norte de Santa Catarina. 2011. 484p. Tese de Doutorado (Pós-Graduação em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.
- ALAN, J.C.; KOMAR, P.D. Are ocean waves increasing in the Eastern north Pacific? **EOS**, v.81, n.47, 2000.
- ALAN, J.C.; KOMAR, P.D. Climate Control son US West Coas Erosion Processes. **Journal of Coastal Research**, v.22, n.3, 0.511-529, 2006.
- ALMEIDA, L.R. **Estudio de dinámica litoral y evolución de la zona sur de la Playa de Piçarras (Santa catarina/Brasil)**. 2013. 259p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Gestão integrada de Zonas Costeiras) - Universidade de Cantábria. Santander, 2013.
- ALVEIRINHO DIAS, J.M. Estudo de Avaliação da Situação Ambiental e Proposta de Medidas de Salvaguarda para a Faixa Costeira Portuguesa. In: Geologia Costeira. 1993. p.13-38.
- ALVES, J.H.G.M. **Refração do Espectro de Ondas Oceânica em Águas Rasas: Aplicações à Região Costeira de São Francisco do Sul, SC**. 1996. 89p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1996.
- ARAUJO, C.E.S.; FRANCO, D.; MELO, E.; PIMENTA, F. Wave Regime Characteristics of the Southern Brazilian Coast. In:

INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL AND PORT ENGINEERING IN DEVELOPING COUNTRIES (COPEDEC), 6., 2003, Colombo, Sri Lanka. **Anais...** [S.I.:s.n.], 2003. CD-ROM.

BACON, S.; CARTER, D.J.T. Wave climate changes in the North Atlantic and North Sea. **International Journal of Climatology**, v.11, p.545-558,1991.

BACON, S.; CARTER, D.J.T. A connection between mean wave height and atmospheric pressure gradient in the North Atlantic. **International Journal of Climatology**, v.13, p.423-436,1993.

BAILARD, J.A. An energetic total load sediment transport model for a plane sloping beach. **Journal of Geophysical Research**, v.86, n.CII, p.10938-10954, 1981.

BAUER, E. Interannual changes of the ocean wave variability in the north Atlantic and in the North sea. **Climate Research**, v.18, p.63-69, 2001.

BIRD, E.C.F. **Coastal geomorphology: An Introduction**. 2. Ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2011. 436p.

BIRKEMEIER, 1985. W.A. Field data on seaward limit of profile change. **Coastal Ocean Engineering**, ASCE: 111, p. 598–602, 1985.

BOEYINGA, J.; DUSSELJEE, D.W.; POOL, A.D.; SCHOUTENS, P.; VERDUIN, F.; VAN ZWICHT, B.N.M.; KLEIN, A.H.F. The effects of bypass dunefields on the stability of a headland bay beach: A case study. **Coastal Engineering**, v.57, p.152-159, 2010.

BONETTI, J.; KLEIN, A.H.F.; MULDER, M.; DE LUCA, C.B.; SILVA, G.V.; TOLDO JR., E.E.; GONZÁLEZ, M. Spatial and numerical methodologies on coastal erosion and flooding risk assessment. In: Finkl, C. (Ed.) **Coastal Hazards**. Coastal Research Library Series. Dordrecht: Springer, 2012. p. 423-442.

BOOIJ, N. **Gravity waves on water with non-uniform depth e currents**. Report n° 81-1, Delft University of Technology, 131. 1981.



BOOIJ, N.; RIS, R.C.; HOTHUIJSEN, L.H. A third-generation wave model for coastal regions, Part I: Model description and validation. **Journal of Geophysical Research**, v.104, n. C4, pp. 7649-7666, 1999.

CAIRES, S.; STERL, A. A new non-parametric method to correct model data: application to significant wave height from the ERA-40 reanalysis. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v.22, n.4, p.443-459, 2005.

CAMPOS, R.M. **Análise dos extremos de onda no Rio de Janeiro associados a ciclones extratropicais no Atlântico Sul**. 2009. 241p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

CAMUS, P. **Metodologías para la definición del clima marítimo en aguas profundas y someras: aplicaciones en el corto, medio y largo plazo**. 2009. 270p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Portos e Costas) - Universidade de Cantábria. Santander, 2009.

CAMUS, P.; MENDEZ, F.; MEDINA, R. A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. **Coastal Engineering**, v.58, p.851-862, 2011.

CAMUS, P.; MENDEZ, F.J.; MEDINA, R.; TOMAS, A.; IZAGUIRRE, C. High resolution downscaled ocean waves (DOW) reanalysis in coastal áreas. **Coastal Engineering**, v.72, p.56-68, 2013.

CARUSO JR., F. Mapa Geológico da Ilha de Santa Catarina – Escala 1:100.000. Texto Explicativo e Mapa. **Notas Técnicas**, Porto Alegre, v.6, p.1-28, 1993.

CEPAL-ONU. Dinâmicas, tendencias y variabilidad climático. Documento 1 del estudio de “Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe”, 2015.

CORRÊA, I.C.S. Distribuição dos sedimentos modernosda plataforma continental entre São Paulo e Santa Catarina. **Pesquisas**, v. 13, p. 109-141, 1980.

COWELL, P.J.; THOM, B.G. Morphodynamics of coastal evolution. *In*: CARTER, R.W.G.; WOODROFFE, C.D. (Org). **Coastal Evolution:**

**Late Quaternary Shoreline Morphodynamics.** Cambridge: Cambridge University Press, 1994. p.33-86.

CRUZ, O. Estudo geomorfológico em áreas costeiras da ilha de Santa Catarina e do continente circunvizinho (Florianópolis, São José, Palhoça, Biguaçu e Governador Celso Ramos). **Relatório Técnico Final de Pesquisa** – CNPq, 1993. 182p.

CRUZ, O. **A ilha de Santa Catarina e o continente próximo: Um estudo da geomorfologia costeira.** Florianópolis, Santa Catarina. Florianópolis, UFSC, 1998. 280p.

DALINGHAUS, C.; SCHWEITZER, A.; HERNANDEZ, A.O.; VIEIRA DA SILVA, G.; OLIVEIRA, J.G.; GOMES DA SILVA, P.; RIBEIRO, P.J.C.; ARAUJO, R.S.; KLEIN, A.H.F. Diferentes abordagens metodológicas para análise das consequências de marés de tempestade: Ambientes praias antropizados e naturais. In: PAULA, D.P.; DIAS, J.A. **Ressacas do Mar/Temporais e Gestão Costeira.** Fortaleza: Premium, 2015. p. 21-64.

DEAN, R.G. **Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf coasts.** Report nº 12, Department of Civil Engineering, Ocean Engineering, University of Delaware, Newark, Delaware. 1977.

DEAN, R.G. Equilibrium Beach Profiles: Characteristics and Applications. **Journal of Coastal Research**, v.7, n.1, p.53-84, 1991.

DEAN, R.G.; DALRYMPLE, R.A. **Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists** World Scientific, 1991. 353p.

DODET, G.; BERTIN, X.; TABORDA, R. Wave climate variability in the North – East Atlantic ocean over the last six decades. **Ocean Modelling**, v.31, p.120-131, 2010.

EGBERT, G.D.; BENNETT, A.F.; FOREMAN, M.G.G. TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model. **Journal of Geophysical Research**, v.99, 1994.

EMERY, W.J.; THOMSON, R.E. **Data analysis methods in physical oceanography.** 2 ed. Amsterdam: Elsevier, 2001. 658p.

ESPEJO, A.; CAMUS, P.; LOSADA, I.; MENDEZ, F. Spectral ocean wave climate variability based on atmospheric circulation patterns. **Journal of Physical Oceanography**, v. 44, n.8, p.2139-2152, 2014.

FARACO, K.R. **Estudo morfodinâmico e granulométrico da praia dos Ingleses – Ilha de Santa Catarina, SC**. 1998. 68p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 1998.

FARACO, K.R. **Comportamento morfodinâmico e sedimentológico da Praia dos Ingleses - Ilha de Santa Catarina - SC, durante o período de 1996 - 2001**. 2003. 119p. Dissertação de Mestrado (Pós-graduação em Geografia) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2003.

FARACO, K.R.; ABREU DE CASTILHOS, J. ; HORN FILHO, N. Morphodynamics aspects and El Niño oscillations in Ingleses Beach, Santa Catarina Island, Southern Brazil. **Journal of Coastal Research**, IS 39, p. 656-659, 2006.

FRANCO, D.; MELO FILHO; E. Relevância dos mares secundários na caracterização de ondas ao largo da Ilha de Santa Catarina, sc (2002 – 2005). In: Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica. Rio Grande, Brasil. **Proceedings... SEMENGO III**. 2008.

FONTOURA, J.A.S. **Hidrodinâmica costeira e quantificação do transporte longitudinal de sedimentos não-coesivos na zona de surfe das praias adjacentes aos molhes da barra do Rio Grande, RS, Brasil**. 2004. 273 p. Tese de Doutorado (Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2004.

FUCELLA, J.E.; DOLAN, R. Magnitude of Subaerial Beach Disturbance During Northeast Storms. **Journal of Coastal Research**. Fort Lauderdale, Florida, v.12, n.4, p.420-429, 1996.

GOMES DA SILVA, P. **Exposição à inundação costeira nas praias dos Ingleses, Moçambique e Barra da Lagoa, Florianópolis, SC**. 2014. 237p. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2014.

GOMES DA SILVA, P.; KLEIN, A.H.F.; GONZÁLEZ, M.; GUTIERREZ, O.; ESPEJO, A. Performance assessment of the database downscaled ocean waves (DOW) on Santa Catarina coast, South Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.87, n.2, p.623:634, 2015.

GONG, D.; WANG, S. Definition of Antarctic oscillation index. **Geophysical Research Letters**, v.26, n.4, p.459-462, 1999.

GONZÁLEZ, M. **Morfología de Playas em Equilibrio: Planta y Perfil**. 1995. 270p. Tese de Doutorado (Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos) – Universidad de Cantabria. Santander, 1995.

GONZÁLEZ, M.; MEDINA, R. On the application of static equilibrium bay formulations to natural and man-made beaches. **Coastal Engineering**, v.43, p.209-225, 2001.

GONZÁLEZ, M.; MEDINA, R.; GONZALEZ-ONDINA, J.; OSORIO, A.; MÉNDEZ, F.J.; GARCIA, E. An Integrated coastal modeling system for analyzing beach processes and beach restoration projects, SMC. **Computer & Geosciences**, v.33, p.916-931, 2007.

GRÉ, J.C.R. Aspectos sedimentares da plataforma continental de Santa Catarina – Brasil. **Geosul**, Florianópolis, v.4, n.8, p.92-100, 1989.

GRUBER, N.L.S. **A antepraia na região de Tramandaí – RS**. 2002. 207p. Tese de Doutorado (Pós-graduação em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

HALLERMEIER, R.J. **Uses for a Calculated Limit Depth to Beach Erosion**. In: Coastal Engineering Conference, ASCE, 16., 1978, Hamburg, Germany. Proceedings... 1978, p.1493-1512.

HALLERMEIER, R.J. A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. **Coastal Engineering**, v.4, p. 253–277, 1981.

HARLEY, M.D.; TURNER, I.L.; SHORT, A.D.; RANASINGHE, R. Interannual variability and controls of the Sydney wave climate. **International Journal of Climatology**, v.30, p.1322-1335, 2010.

HEMER, M.A.; CHURCH, J.A.; HUNTER, J.R. Waves and climate change on the Australian coast. **Journal of Coastal Research**, SI50, p.432-437, 2007.

HEMER, M.A.; CHURCH, J.A.; HUNTER, J.R. Variability and trends in the directional wave climate of the Southern Hemisphere. **International Journal of Climatology**, v.30, p.475-491, 2010.

HESP, P.A.; GIANNINI, P.C.F.; MARTINHO, C.T.; MIOT DA SILVA, G.; ASP NETO, N.E. The Holocene Barrier Systems of Santa Catarina Coast, Southern Brazil. In: DILLENBURG, S.R.; HESP, P. **Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil**. Berlin: Springer, 2009. p. 93-133.

HOEFEL, F.G. **Morfodinâmica de Praias Arenosas: Uma Revisão Bibliográfica**. Itajaí: UNIVALI, 1998. 90 p.

HOLTHUIJSEN, L.H. **Waves in Oceanic and Coastal Waters**: Cambridge University Press, Cambridge, 2007. 387p.

HORN FILHO, N.O. Granulometria das Praias Arenosas da Ilha de Santa Catarina, SC. **GRAVEL**, n.4, p.1-21, 2006.

HSU, J. R.-C.; EVANS, C. Parabolic Bay Shapes and Applications. In: Institution of Civil Engineers – Part 2, 1989, Londres. **Proceedings...** Londres: Thomas Telford, 1989. p.557-570.

HSU, J.R.C; BENEDET, L; KLEIN, A.H.F.; RAABE, A.L.A.; TSAI, C-P.; HSU, T-W. Appreciation of Static Bay Beach Concept for Coastal Management and Protection. **Journal of Coastal Research**, v.24, n.1, p. 812–835, 2008.

HSU, J.R.-C; YU, M.-J.; LEE, F.-C.; Benedet, L. Static bay beach concept for scientists and engineers: A review. **Coastal Engineering**, v. 57, p. 76-91, 2010.

IPCC. **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation**. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor,

and P.M. Midgley (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 2012. 582 p.

ISDR (INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION). **Living With Risk**. A Global Review of Disaster Reduction Initiatives. United Nations, Inter-Agency Secretariat. ISDR Secretariat. Preliminary Version. Geneva, Switzerland, 2002. 348p.

JACKSON, D.W.T.; COOPER, J.A.G. Application of the equilibrium planform concept to natural beaches in Northern Ireland. **Coastal Engineering**, v.57, p.112-123, 2010.

KAMPHUIS, J.W. Introduction to Coastal Engineering and Management. In: **Advanced Series on Ocean Engineering**. Singapura: World Scientific, 2000. 437p.

KLEIN A.H.F. Um método indireto para a determinação do estágio morfodinâmico de praias oceânicas arenosas. In: VI Congresso da Associação Brasileira dos Estudos do Quaternário, 1997, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ABEQUA, 1997. p.82-84.

KLEIN, A.H.F.; MENEZES, J.T. Beach morphodynamics and profile sequence for a headland bay coast. **Journal of Coastal Research**, West Palm Beach (Florida), v.17, n.4, p.812-835, 2001.

KLEIN, A.H.F.; BENEDET FILHO, L.; HSU, J.R.C. Stability of headland bay beaches in Santa Catarina: A case study. **Journal of Coastal Research**, v.35 (SI), p.151-166. 2003.

KLEIN, A.H.F. **Morphodynamics of Headland Bay Beaches**. 2004. 450 p. Tese de Doutorado (Ciências do Mar) – Universidade do Algarve, Faro, Portugal. 2004.

KLEIN, A.H.F.; MOCELLIM, O.; MENEZES, J.T.; BERRIBILLI, M.; VINTÉM, G.; DAFFERNER, G.; DIEHL, F.L.; SPERB, R.M.; SANTANA, G.G. Beach Safety Management on the Coast of Santa Catarina, Brazil. **Z. Geomorph.**, Berlin – Stuttgart, v.141, p. 47-58, 2005.

KLEIN, A.H.F.; MENEZES, J.T.; DIEHL, F.L.; ABREU, J.G. N.; POLETTE, M.; SPERB, R.M.; SPERB, R.C. SANTA CATARINA. In:

MUEHE, D. (Ed.). **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006.

KLEIN, A.H.F.; FERREIRA, O.; DIAS, J.M.A.; TESSLER, M.G.; SILVEIRA, L.F.; BENEDET, L.; MENEZES, J.T.; ABREU, J.G.N. Morphodynamics of structurally controlled headland-bay beaches in southeastern Brazil: A review. **Coastal Engineering**, v.57, p.98-111, 2010.

KLEIN, A.H.F.; PRADO, M.F.V.; DALINGHAUS, C.; CAMARGO, J.M. **Metodologia para quantificação de perigos costeiros e projeção de linhas de costa futuras como subsídio para estudos de adaptação da zonas costeiras: litoral norte da Ilha de Santa Catarina e entorno**. Florianópolis, 2016. 206p. (Relatório Técnico Final)

KLEIN, A.H.F.; SHORT, A.D; BONETTI FILHO, J. Santa Catarina Beach Systems. In: KLEIN, A.H.F.; SHORT, A.D. (Eds.). **Brazilian Beach Systems**. Springer, 2016. (Ed.).

KOMAR, P.D. **Handbook of Coastal Processes and Erosion**. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1983. 305 p.

KOMAR, P.D. **Beach processes and sedimentation**. New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1998.

KRUEGER, J. **Análise dos parâmetros meteorológicos e oceanográficos dos eventos de ressaca, ocorridos entre Janeiro de 2001 à Dezembro de 2010, no estado de Santa Catarina**. 2011. 77p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia). Universidade do Vale do Itajaí. Itajaí, 2011.

LAING, A.K. New Zealand wave climate from satellite observations. **New Zealand Journal of marine and Freshwater Research**, v.34, p.727-744, 2000.

LARSON, M.; KRAUS, N.C.; WISE, R.A., Equilibrium beach profiles under breaking and non-breaking waves. **Coastal Engineering**, v. 36, p. 59-85, 1999.

LEAL, P.C. **Sistema Praial Moçambique Barra da Lagoa, Ilha de Santa Catarina, Brasil: Aspectos morfológicos, morfodinâmicos,**

**sedimentológicos e ambientais.** 1999. 125p. Dissertação de mestrado (Pós – graduação em Geografia). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 1999.

MANTUA, N.J.; HARE, S.R. The Pacific Decadal Oscillation. **Journal of Oceanography**, v.58, p.35-44, 2002.

MARTINO, E.; MORENO, L.J.; KRAUS, N.C. Engineering guidance for the use of bayed-beach formulations. In: Coastal Sediments, 2003. **Proceedings...** ASCE, 2003.

MELO FILHO, E.; HAMMES, G.R.; FRANCO, D. Estudo de caso: A ressaca de agosto de 2005 em Santa Catarina. In: SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA, 2., 2006, Rio Grande. **Anais...** Rio Grande, 2006.

MENÉNDEZ, M.; MÉNDEZ, F.J.; LOSADA, I.J.; GRAHAN, N.E. Variability of extreme wave Heights in the northeast Pacific ocean based on buoys measurements. **Geophysical Research Letters**, v.35, L22607, 2008.

MÍNGUEZ, R.; ESPEJO, A.; TOMÁS, A.; MÉNDEZ, F.J.; LOSADA, I.J. Directional calibration of wave reanalysis databases using instrumental data. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v.28, p.1466–1485, 2011.

MÍNGUEZ, R.; REGUERO, B.G.; LUCEÑO, A.; MÉNDEZ, F.J. Regression models for outlier identification (Hurricanes and Typhoons) in wave hindcast databases. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v.29, p.267–285, 2012.

MIOT DA SILVA, G. **Efeito do estado de equilíbrio em planta na sedimentologia de praias desenvolvidas entre promontórios.** 2002. 134p. Dissertação de Mestrado (Pós-graduação em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2002.

MIOT DA SILVA, G. **Orientação da linha de costa e dinâmica dos sistemas praia e duna: Praia de Moçambique, Florianópolis, SC.** 2006. 290p. Tese de doutorado (Pós-graduação em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2006.



MIOT DA SILVA, G.; KLEIN, A.H.F.; ALMEIDA, L.E.S.B. de. Effect of planform equilibrium state in the sedimentology of headland bay beaches. **Journal of Coastal Research**, v.39, p.692-696, 2006.

MIOT DA SILVA, G.; HESP, P.A. Coastline orientation, Aeolian sediment transport and foredune dynamics. **Geomorphology**, v.120, n.3-4, p.258-278, 2010.

MIOT DA SILVA, G.; MOUSAVI, S.M.S.; JOSE, F. Wave-driven sediment transport and beach-dune dynamics in a headland bay beach. **Marine Geology**, v. 323-325, p.29-46, 2012.

MMA (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE). Diálogos Brasil – Espanha: Sistema de Modelagem Costeira. **Resumo Executivo**. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL BRASIL-ESPANHA: A EXPERIÊNCIA ESPANHOLA E A APLICAÇÃO DO SMC BRASIL NO APOIO À GESTÃO DA COSTA BRASILEIRA,2. Brasília: IABS, 2013. 69p.

MMA (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC: Documento Temático – Ondas**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. No prelo (a).

MMA (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE). **Documento temático: Recuperação de Praias**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. No prelo (b).

MMA (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC: Manual do Usuário - SMC 3.0**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. No prelo (c).

MMA (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC: Manual de Referência - SMC Tools**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. No prelo (d).

MMA (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC: Manual de Referência – OLUCA/SP**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. No prelo (e).

MMA (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC: Manual de Referência – COPLA MC/SP**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. No prelo (f).

MMA (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC: Manual de Referência – EROS MC/SP**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. No prelo (g).

MMA (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC: Documento Temático – Níveis**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. No prelo (h).

MONTEIRO, M.A.; FURTADO, S.M. de A. O clima do trecho Florianópolis – Porto Alegre: Uma abordagem dinâmica. **Geosul**, Florianópolis, n.19/20, p.117-133, 1995.

MORENO, L.J.; KRAUS, N.C. Equilibrium Shape of Headland-Bay Beaches for Engineering Design. In: Coastal Sediments, 1999. **Proceedings...** ASCE: 1999. p. 860- 875.

MUEHE, D. Aspectos gerais da erosão costeira no Brasil. **Mercator**, v.4, n.7, p.97-110, 2005.

MUEHE, D. (Ed.). **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006.

MULER, M. **Avaliação da vulnerabilidade de praias da ilha de Santa Catarina a perigos costeiros através da aplicação de um índice multicritério**. Dissertação de mestrado (Pós - Graduação em Geografia) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

OLIVEIRA, U.R. DE. **Relações entre a morfodinâmica e a utilização em trechos da costa oceânica da ilha de Santa Catarina, SC, Brasil**. 2009. 198p. Tese de Doutorado (Pós- Graduação em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

OLIVEIRA, F.S.B.F.; BARREIRO, O.M. Application of empirical models to bay-shaped beaches in Portugal. **Coastal Engineering**, v.57, p.124-131, 2010.

OLIVEIRA, J.G. **Modelagem numérica das respostas do perfil praiial a eventos extremos em praias de enseada: Estudo de caso da enseada do Itapocorói, Santa Catarina, Brasil.** 2013. 163p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2013.

OPEN UNIVERSITY, THE. **Waves, Tides and Shallow-Water Processes.** 2 ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999. 227p.

PAWLOWICZ, R.; BEARDSLEY, B.; LENTZ, S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE. **Computers and Geosciences**, v.28, p.929-937, 2002.

PENVEN, P.; MARCHESIELLO, P.; DEBREU, L.; LEFEVRE, J. Software tools for pre- and post-processing of oceanic regional simulations. **Environmental Modelling & Software**, v.23, p.660-662, 2007.

PEREIRA, N.E.S.; KLUMB-OLIVEIRA, L.A. Analysis of the influence of ENSO phenomena on wave climate on the central coastal zone of Rio de Janeiro (Brazil). **Revista da Gestão Costeira Integrada**, 2015.

PINTO, M.W. Evolução morfodinâmica em escala histórica do campos de dunas do Santinho-Ingleses no norte da ilha de Santa Catarina. 2015. 165p. Dissertação de Mestrado (Pós – graduação em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.

PORPILHO, D. **Padrão morfológico e sonográfico da plataforma continental interna adjacente ao setor leste da ilha de Santa Catarina.** 2015. 137p. Dissertação de Mestrado (Pós – graduação em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.

PORPILHO, D.; KLEIN, A.H.F.; DE CAMARGO, R.S.V.; PRADO, M.F.V.; SHORT, A.D.; VIEIRA DA SILVA, G.; TOLDO JR., E.E. Bedform Classification in Front of Santinho Headland, Santinho Beach - Santa Catarina Island, Brazil. In: Coastal Sediments'15, 2015, San Diego - CA, USA. **Proceedings...** 2015.

PINTO, M.W. Evolução morfodinâmica em escala histórica do campo de dunas do Santinho – Ingleses no norte da ilha de Santa Catarina.

2016. 165p. Dissertação de Mestrado (Pós – graduação em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2016.

RADER, A.C. On the parabolic equation method for water-wave propagation. **Journal of Fluid Mechanics**, v.95, p. 159-176, 1979.

REGUERO, B.G.; MENÉNDEZ, M.; MÉNDEZ, F.J.; MÍNGUEZ, R.; LOSADA, I.J. A Global Ocean Wave (GOW) calibrated reanalysis from 1948 onwards. **Coastal Engineering**, v.65, p.38-55, 2012.

ROPELEWSKI, C.F.; JONES, P.D. An extension of the Tahiti-Darwin Southern Oscillation Index. **Notes and Correspondence**, v.115, p.2161-2165, 1987.

RUDORFF, F. de M.; BONETTI, J.; MORENO D. Maré de Tempestade. In: HERRMANN, M. L. de P. (Org.) **Atlas de Desastres Naturais de Santa Catarina**. 1º. ed. Florianópolis: CopyLaser Gráfica Digital, 2006. v. 1. p. 117-120.

RUDORFF, F.M.; BONETTI, J. Avaliação da suscetibilidade à erosão costeira de praias da ilha de Santa Catarina. **BJAST**, v.14, n.1, p.9-20, 2010.

SCHWEITZER, A. **Monitoramento da Linha de Costa: Uma análise de métodos e indicadores aplicados em investigações na escala de eventos**. 2013. 151p. Dissertação de Mestrado (Pós – Graduação em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2013.

SHCHEPETKIN, A.F.; MCWILLIAMS, J.C. The regional oceanic modeling system (ROMS) a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. **Ocean Modelling**, v. 9, n. 4, p. 347–404, 2005.

SHORT, A.D. **Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics**. New York: John Wiley & Sons, 1999. 379p.

SHORT, A. D.; MASSELINK, G. Embayed and structurally controlled beaches. In: SHORT, A. D. (Ed.). **Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics**. New York: John Wiley & Sons, 1999 p.230-250.

SIGNORIN, M. **Análise e comparação do clima de ondas do norte, centro e sul de Santa Catarina utilizando modelagem numérica.** 2010. 167p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia) - Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí. 2010.

SILVEIRA, L.F.da. **Análise da Morfodinâmica e da Estabilidade da Forma em Planta das Praias de Enseada do Estado de Santa Catarina e do Litoral Norte de São Paulo Utilizando Imagens Aéreas.** 2008. 103p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia) - Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí. 2008.

SILVEIRA, L.F.; KLEIN, A.H.F.; TESSLER, M.G. Headland bay beach planform stability of Santa Catarina satate and of the northern coast of São Paulo state. **Brazilian Journal of Oceanography**, v.58, n.2, p.101-122, 2010.

SILVESTER, R.; HSU, J.R.C. **Coastal Stabilization.** Advanced Series on Ocean Engineering. V. 14. Singapore: World Scientific, 1997. 578p.

SIMÓ, D.H.; HORN FILHO, N.O. Caracterização e distribuição espacial das “ressacas” e áreas e risco na ilha de Santa Catarina, SC, Brasil. **GRAVEL**, v.2, p.93-103, 2004.

TAIANI, L.R.P.M. **Transporte de sedimentos não-coesivos na zona de surfe: Teorias e Técnicas de Medição – uma revisão.** 2010. 181p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia) – Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, 2010.

TESSLER, M.T. Esquematização do clima de ondas da Baía de Campos para modelagem numérica de morfologia costeira em escalas temporais de meses a anos. 2010. 123p. Relatório de Estágio (Graduação em Oceanografia) – Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, 2010.

TOLMAN, H.L. Distributed memory concepts in the wave model WAVEWATCH III. **Parallel Computing**, v.28, p.35-52, 2002.

TRUCOLLO, E.C. **Maré meteorológica e forçantes atmosféricas locais em São Francisco do Sul – SC.** 1998. 100p. Dissertação de mestrado (Pós – graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

TRUCCOLO, E.C.; FRANCO, D.; SCHETTINI, C.A. F. The low frequency sea level oscillations in the northern coast of Santa Catarina, Brazil. **Journal of Coastal Research**, Itajaí, v.39 (SI), p.547- 552, 2006.

USACE (US ARMY CORPS OF ENGINEERS), Water Wave Mechanics. In: USACE. **Coastal Engineering Manual** – Chapter 1, Part II. Vicksburg, Mississippi: EM 1110-2-1100, 2002a. 121p.

USACE (US ARMY CORPS OF ENGINEERS), Longshore Sediment Transport. In: USACE. **Coastal Engineering Manual** - Chapter 2, Part III. Vicksburg, Mississippi: EM 1110-2-1100, 2002b. 113p.

VAN RIJN, L.C. **Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas**. Amsterdam, Holanda: Aqua Publications, 1993.

VAN RIJN, L.C. **Principles of Coastal Morphology**. Amsterdam, Holanda: Aqua Publications, 1998.

VIEIRA DA SILVA, G.; MULDER, M.; PRADO, M.F.V.; SHORT, A.D.; KLEIN, A.H.F.; TOLDO JUNIOR, E. Shoreline change analysis and insight into the sediment transport path along Santa Catarina island. North shore, Brazil. **Journal of Coastal Research**, 2016a.

VIEIRA DA SILVA, G.; TOLDO JUNIOR, E.; KLEIN, A.H.F.; SHORT, A.D.; WOODROFFE, C.D. Heandland sand bypassing – Quantification of net sediment transport in embayed beaches, Santa Catarina island north shore, Southern Brazil, v.379, p.13-27, 2016b.

VINTEM, G. O efeito do tamanho de grão de areia no processo de transporte eólico dos campos de dunas transgressivas do litoral do estado de Santa Catarina – Brasil. 2003. 130p. Dissertação de Mestrado (Pós – Graduação em Geociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

WHITE, T.E. Status of measurement techniques for coastal sediment transport. **Coastal Engineering**, v.35, p.17-45, 1998.

WOOLF, D.K.; CHALLENGOR, P.G.; COTTON, P.D. Variability and predictability of the north Atlantic wave climate. **Journal of Geophysical Research**, v.107, n.C10, 2002.

WRIGHT, L.D.; THOM, B.G. Coastal Depositional Landforms: A Morphodynamic Approach. **Progress in Physical Geography**, v.1, p.412-459, 1977.

YOUNG, I.R. Wind Generated Ocean Waves. Oxford: Elsevier, 1999. 286p.

YOUNG, I.R.; ZIEGER, S.; BABANIN, A.V. Global trends in wind speed and wave height. **Science**, v.332, p.451-455, 2011.

## APÊNDICE A

### FORMULÁRIOS ETAPAS DA MODELAGEM

#### ETAPA 1: DEFINIÇÃO DO PROJETO

<b>Este formulário foi atualizado por:</b>	<b>Data</b>
Charline Dalinghaus	07/11/2013
Charline Dalinghaus	25/03/2014
Charline Dalinghaus	07/12/2015

<b>Trabalho</b>	<b>Cliente</b>	<b>Data de Início</b>
Análise da estabilidade da forma em planta e de perfil e transporte de sedimentos nas praias da Barra da Lagoa, Moçambique e Ingleses	UFSC	01/03/2013
<b>Descrição do problema - Descreva brevemente, em palavras, o problema (sem detalhes):</b>		
<p>O clima de ondas em escala histórica sofreu alterações. As ondas do quadrante leste apresentam ocorrências mais frequentes, alterando a posição junto a costa da separação entre a zona abrigada e as zonas expostas das praias de enseadas ou gerando correntes de retorno controladas topograficamente. Houve mudança na direção do clima de ondas com o passar dos anos? A forma em planta, a longo prazo, se encontra em equilíbrio? O perfil praias médio, ao longo dos anos, se encontra em equilíbrio? Qual a direção dominante do transporte de sedimentos?</p>		

- Circule o(s) domínio(s) do problema: (modelos hidrodinâmicos, modelos de enchente, modelos de ondas, modelos



**morfológicos**, modelos de qualidade de água, modelos de emissão, outros modelos).

- Preencha os seguintes campos a respeito dos processos físicos envolvidos neste projeto de modelagem:

<b>Processos relevantes</b>	<b>Escala temporal característica</b>	<b>Escala espacial</b>
Propagação de ondas	Eventos (anos)	Mesoescala (quilômetros)
Propagação de correntes	Eventos (anos)	Mesoescala (quilômetros)
Transporte de sedimentos	Eventos (anos e extremos)	Mesoescala (quilômetros)
Perfil de equilíbrio	Eventos	Microescala (metros)
Forma em planta	Eventos	Mesoescala (quilômetros)

- Qual é a razão para a aplicação do modelo (Análise de impacto, definição de componentes de projeto, análise de viabilidade, estimativa de custos operacionais)?

Análise de impacto e variabilidade do comportamento da praia.

## 1.1 Defina o objetivo

- Que questões devem ser respondidas usando o modelo?

Estabelecer o padrão de transporte de sedimentos dentro das enseadas e estabelecer se a praia está em equilíbrio, se este é estático ou dinâmico.

## 1.2 Analise o contexto e defina acordos quanto à justificativa

### 1.2.1 Coordenação com o cliente

Foi concordado com o cliente avaliar as seguintes etapas do projeto de modelagem para pré-aprovação nos seguintes momentos de decisão:

- Resultados da propagação de ondas

Resultados da propagação de correntes

Escolha da escala temporal de análise dos resultados

Os seguintes acordos especiais foram feitos com o cliente com relação a relatórios e finalização.

Apresentação de relatório final no formato de dissertação e o presente formulário preenchido.

1.3 Defina os requisitos

1.3.1 Requerimentos de expertise

- As seguintes pessoas e suas expertises serão empregadas do projeto de modelagem:

Nome da pessoa	Expertise
Charline Dalinghaus	Modelagem de processos costeiros
Antonio Klein	Morfodinâmica de ambientes costeiros

### 1.3.2 Estimativa da capacidade da mão-de-obra

- O seguinte esforço de trabalho é requerido para o projeto de modelagem:

<b>Tarefa</b>	<b>Tempo (dias)</b>	<b>A ser aplicado na etapa</b>
Estudar os manuais do programa SMC	60	Etapa 1
Estudar a teoria envolvida	120	Etapa 1
Confecção da batimetria homogênea	30	Etapa 2
Confecção de malhas de cálculo	10	Etapa 2
Simulação dos estados de mar escolhidos (OLUCA)	20	Etapa 3
Reconstrução da série	10	Etapa 4
Simulação de correntes (COPLA)	20	Etapa 5
Identificar eventos extremos	10	Etapa 6
Cálculo do transporte de sedimentos	10	Etapa 7
Cálculo do perfil de equilíbrio	10	Etapa 7

Cálculo da forma em planta	10	Etapa 7
Confecção do documento final	30	Etapa 8

### 1.3.3 Comunicação e relatórios

- As seguintes reuniões foram planejadas e executadas no escopo do projeto de modelagem:

<b>Atividade</b>	<b>Quando</b>	<b>Pessoas Envolvidas</b>	<b>Assunto</b>
Campo coleta de sedimentos	Junho/ 2013	LOC/MMA-Riscos	Coleta de sedimentos nas áreas de estudo no âmbito do projeto MMA-Riscos
Escolha dos pontos DOW	Agosto/ 2013	Charline Dalinghaus, Paula Gomes Anotnio Klein	Seleção dos pontos DOW a serem utilizados para solicitá-los junto ao IH Cantabria
Aplicação do modelo SMC	Novembro/ 2013	Charline Dalinghaus, Antonio Klein, Mauricio Gonzalez	Discussão sobre a forma mais correta de aplicação do modelo e confecção das malhas
Campo batimetria	2013/ 2014	LOC/MMA-Riscos	Aquisição dos dados batimétricos no âmbito do projeto MMA-Riscos
Análise do clima de ondas	Agosto/ 2014	Charline Dalinghaus, Antonio Klein	Primeiras ideias sobre artigo de análise do clima de ondas

Análise do clima de ondas	Abril/2015	Charline Dalinghaus, Antonio Klein, João Alveirinho Dias	Análises preliminares dos resultados estatísticos do clima de ondas
Análise do clima de ondas	Agosto/2015	Charline Dalinghaus, Antonio Klein, João Alveirinho Dias	Análise dos resultados estatísticos do clima de ondas
Confecção do documento final	Março/2016	Charline Dalinghaus, Antonio Klein	Resultados finais – Documento final

- Que relatórios devem ser feitos para o projeto de modelagem?

<b>Tipo de relatório (progresso, parcial, final)</b>	<b>Quando</b>	<b>Destinado a quem</b>
Parcial (Qualificação)	Abril/2014	PPGGEO / Banca de avaliação
Final (Defesa)	Março/2016	PPGGEO / Banca de avaliação

## ETAPA 2: CONFIGURAR O MODELO

<b>Este formulário foi atualizado por:</b>	<b>Data</b>
Charline Dalinghaus	07/11/2013
Charline Dalinghaus	25/03/2014
Charline Dalinghaus	07/12/2015

### 2.1 Analisar os dados

#### 2.1.1 Dados básicos requeridos para uma simulação

Dados espaciais	-Batimetria original (Cartas náuticas + processamento) - Batimetria de detalhe (.xyz)
Séries temporais	Parâmetros de ondas (reanálise DOW)
Valores iniciais	Ingleses – Ponto DOW (x:-48,2817; y:-27,3542 )  Moçambique/Barra da Lagoa – Ponto DOW (x: -48,1805; y: -27,7152: )
Condições de fronteira	Aberta (não apresenta uma barreira física para a propagação)
Parâmetros	Profundidade, frequência máxima, frequência de pico, parâmetro gama, número de componentes, direção de propagação, amplitude de maré.
Dados dos cenários	Combinação entre os dados espaciais e parâmetros de ondas, correntes e transporte.
Outros dados necessários	Sedimentologia e batimetria.

## 2.1.2 Dados de outros modelos

De que outros modelos este projeto usa resultados?	Não há necessidades de dados de outros modelos.
Que requerimentos são feitos aos resultados de outros modelos (formato, calibração, discretização, meta-dados)?	---
Quem irá fornecer os resultados dos outros modelos, e quando?	---
Quem irá aprovar o uso dos resultados dos outros modelos?	---

## 2.1.3 Dados requeridos para análise

Observações do sistema (medições em campo)	Sim. Dados de batimetria e sedimentologia.
--	--

## 2.1.4 Disponibilidade de dados de campo

Existem dados de campo disponíveis?	Sim - Projeto MMA-Riscos
Onde estão os dados?	Arquivados HD Projeto MMA-Riscos
Os dados estão disponíveis em versão digital?	Sim
Como foi procedido com <i>outliers</i> ou dados anômalos?	O tratamento dos dados ainda não foi finalizado, mas estes tem sido tratados com softwares específicos (Hypack 2013).
Como foi procedido quanto aos dados que faltavam?	Na impossibilidade de utilizar dados batimétricos de detalhe foram utilizados dados de batimetria de <i>side scan</i> .
Descrever a qualidade dos dados	Os dados de <i>side scan</i> possuem qualidade suficiente para uma análise inicial dos resultados.

Quem foi responsável por disponibilizar os dados?	Projeto MMA-Riscos
---	--------------------

## 2.2 Tipo de modelo

Domínio da aplicação	Análise em perfil e planta. Transporte de sedimentos.
Dinâmico/Estacionário	Estacionário
Número de dimensões espaciais	Duas (horizontal) 2DH, 2DV
Qual programa de modelagem foi escolhido?	Módulo de propagação de ondas (OLUCA) Módulo de propagação de correntes (COPLA) Módulos de análise de praia a longo prazo do Sistema de Modelagem Costeira (SMC). Versão 3.0. Criado pelo IH-Cantábria
Por que este programa de modelagem foi escolhido?	Disponibilidade, teste de metodologia e por calcular os processos de refração e difração de forma mais precisa.
Existe outra opção melhor com base no conteúdo, e qual seria esta opção?	Não.
Por que esta melhor opção não foi escolhida?	---

## 2.3 Modelo Conceitual

- Descreva o modelo conceitual geral em palavras

APÊNDICE B
------------

## 2.4 Discretização no espaço e tempo

Descreva a esquematização espacial (resolução, área geográfica)	Resolução variou de malha para malha de forma a respeitar as limitações do modelo.
---	--



	<p>Ingleses: Resolução da malha de detalhe com 25m e malha de entrada com 100m.</p> <p>Moçambique/Barra da Lagoa: Resolução da malha de detalhe de 25m, com uma malha de entrada com 100m.</p>
Que escolhas foram feitas quanto a discretização no tempo (com relação a aproximação numérica)?	Não foram necessárias discretizações temporais.

## 2.5 Esquematização de condições de fronteira

Foi feita alguma esquematização de longo prazo (anual, 5 anos <i>etc</i> ) de clima de ondas/marés e ventos para modelagem morfológica?	Não foram feitas esquematizações de longo prazo.
Que método foi utilizado nestas esquematizações?	Diferenças Finitas

### ETAPA 3: ANÁLISE DO MODELO

Este formulário foi atualizado por:	Data
Charline Dalinghaus	07/11/2013
Charline Dalinghaus	25/03/2014
Charline Dalinghaus	07/12/2015

#### 3.1 Quais atividades de análise do modelo foram executadas?

- Indicar quais atividades de análise foram executadas:

Qual?	Sim/não	Comentários
Rodada com parâmetros <i>default</i>	Não	---
Teste de comportamento global/estabilidade	Sim	Rodadas iniciais apontaram instabilidade na propagação de casos com direções próximas à orientação das isóbatas. As malhas foram ajustadas com relação a direção e espaçamento para evitar tais tipos de instabilidade.
Análise de sensibilidade	Sim	Resolução e tamanho das malhas.
Calibração	Não	---
Análise de incerteza	Não	---
Validação	Não	---

#### 3.2 Fazer uma análise geral do modelo

##### 3.2.1 Rodar com *input* default

Descrever o <i>input</i>	---
--------------------------	-----

Como foi o progresso da rodada?	---
Os resultados são compreensíveis e próximos de uma calibração?	---

### 3.2.2 Teste de comportamento global

- Que mudanças de característica foram testadas com o intuito de verificar o comportamento/estabilidade do modelo (timestep, **resolução de grade**, mais nutrientes, tipo de sedimento, etc.):

Foram testadas malhas com diferentes tamanhos e resoluções até chegar na ideal para a área de estudo.

### 3.3 Análise de sensibilidade

Foi realizada alguma análise de sensibilidade, e, se sim, com que parâmetros?	Resolução das malhas, subdivisão das malhas de acordo com o período de pico do caso de onda propagado.
Valores sensíveis (incluindo parâmetros) são:	Resolução, tamanho e subdivisões das malhas.
Valores não sensíveis são:	---

### 3.4 Calibração

Realizou-se calibração?	Não.
Como foi feita a escolha de fatores a serem calibrados?	---
Que medida foi usada para determinar o progresso e o resultado da calibração?	---

Que método e/ou pacote foi usado	---
Qual critério foi usado para parar a calibração?	---
Atendeu o critério definido anteriormente?	---
Realizou-se análise de erros residuais?	---
Os erros residuais são sistemáticos?	---
Quanto tempo (em dias homem) foi gasto na calibração?	---
Aonde se encontram todas as rodadas de calibração no servidor?	---
Aonde se encontram o arquivo <i>README</i> descrevendo a evolução do processo de calibração?	---
Alguma lição especial foi aprendida durante esta calibração?	---

### 3.5 Análise de incerteza

Foi feita uma estimativa das incertezas nos resultados do modelo?	Não.
As análises de incerteza foram conduzidas com base em uma análise de covariância?	---

As análises de incertezas foram realizadas de maneira diferente?	---
--	-----

### 3.6 Validação do modelo

Os resultados do modelo calibrado foram comparados com dados medidos diferentes dos usados na calibração?	---
Caso contrario, por que não?	---

## ETAPA 4: SIMULAÇÕES DE PRODUÇÃO

Este formulário foi atualizado por:	Data
Charline Dalinghaus	07/11/2013
Charline Dalinghaus	25/03/2014
Charline Dalinghaus	07/12/2015

### 4.1 Descrever as eventuais rodadas de produção em termos de:

Dados de entrada utilizados	Dados de onda e nível da base de dados do SMC Brasil
A versão (calibrada) do modelo utilizada foi:	SMC 3.0 (MOPLA)
O(s) período(s) simulados foram:	1948-2008
Quem executou as rodadas de produção?	Charline Dalinghaus
Quantos cenários de produção foram simulados?	400. 200 para cada praia, 100 em baixamar e 100 em preamar.
Aonde as rodadas de produção foram armazenadas?	Notebook pessoal (Charline Dalinghaus) HD Pessoal (Charline Dalinghaus) PC – LOG HD Externo (Projeto SMC Brasil)  Todos em:  ...\CHARLINE\01_MESTRADO_CHARLINE_2013-2015\04_dados_finais
Aonde se encontram o arquivo <i>README</i> descrevendo as rodadas de produção?	Todos em:  ...\CHARLINE\01_MESTRADO_CHARLINE_2013-2015\04_dados_finais

## 4.2 Verificar os resultados

Os resultados das rodadas de produção estão dentro das expectativas do razoável?	Sim. É possível verificar alguma instabilidade no modelo nas bordas, mas nada que afete a área de interesse.
Caso contrário, que resultados inesperados foram encontrados nos resultados?	---
Existem indicadores de erros numéricos (discretização no espaço e tempo) e, se sim, quais são eles?	Alguns casos apresentam indicadores de erros numéricos (intensificação de vetores junto às fronteiras das malhas).

## 4.3 Isso é tudo?

Que requerimentos de qualidade não foram atendidos?	Batimetria de detalhe
Quais dos dados necessários não foram disponibilizados?	Batimetria de detalhe totalmente processada, dados de ondas em águas rasas não estavam disponíveis para a validação do modelo.
O número de observações e medições foi suficiente para o projeto de modelagem?	Sim.
A discretização no espaço e no tempo foi escolhida bem?	Sim
Foi escolhido o modelo ou programa de modelagem correto?	Sim, os processos foram representados como proposto.
A escolha da esquematização numérica das condições de contorno foi adequada?	Sim
A implementação do modelo pode ser melhorada? Se sim, como?	Dados batimétricos de detalhe.

Que análises dos resultados do modelo forem efetuadas?	Análise da atenuação da energia de onda devido aos processos de refração e difração. Maior transporte de sedimentos em locais com intensificação de correntes.
O modelo atende o escopo requerido pelo modelo?	Sim
As rodadas, destinadas a encontrar respostas às perguntas feitas, levaram em consideração qualquer incerteza nos resultados?	Sim.
O que mais pode ser notado no projeto de modelagem?	---



## ETAPA 5: INTERPRETAR OS RESULTADOS

Este formulário foi atualizado por:	Data
Charline Dalinghaus	07/11/2013
Charline Dalinghaus	25/03/2014
Charline Dalinghaus	07/12/2015

### 5.1 Descrever os resultados

Onde podem ser encontrados os resultados e uma descrição dos resultados?	<p><b>Resultados:</b>          Notebook pessoal (Charline Dalinghaus)          HD Pessoal (Charline Dalinghaus)          PC – LOG          HD Externo (Projeto SMC Brasil)</p> <p>Todos em:</p> <p>...\CHARLINE\01_MESTRADO_CHARLINE_2013-2015\04_documento_final</p> <p><b>Descrição:</b>          - Dissertação Charline Dalinghaus</p>
--	---

### 5.2 Discutir os resultados

Resultados inesperados foram encontrados?	Não
Os resultados inesperados podem ser explicados?	---

Outros pontos de crítica com relação aos resultados da rodadas de produção?	Alguns casos de onda propagados apresentaram instabilidade numérica em zonas próximas ao contorno. O problema foi evitado com o afastamento dos contornos da área de interesse.
---	---

### 5.3 O objetivo foi alcançado?

Em que pontos o objetivo foi alcançado?	Visualização dos processos de refração e difração das ondas incidentes na área de estudo. Atenuação da energia de onda a medida que a profundidade diminui. Correntes na direção de propagação das ondas. Transporte na direção das correntes.
Em que pontos o objetivo não foi alcançado?	---
O cliente está satisfeito?	Sim.

### 5.4 Sumarizar os resultados

O sumário executivo do projeto de modelagem é o seguinte (copiar sumário executivo do relatório)	Não existe um sumário executivo de modelagem.
--	---

## ETAPA 6: REPORTAR E ARQUIVAR O PROJETO DE MODELAGEM

Este formulário foi atualizado por:	Data
Charline Dalinghaus	07/11/2013
Charline Dalinghaus	25/03/2014
Charline Dalinghaus	07/12/2015

### 6.1 Reportando

O relatório usa os padrões deste guia	<b>Completamente</b> /parcialmente/não em todos
Existe um relatório do projeto de modelagem?	Sim. Dissertação Charline Dalinghaus
Existirá algum relatório científico adicional do projeto de modelagem? Se sim, em que jornal?	Sim. A partir dos dados de reanálises analisou-se a variabilidade do clima de ondas em águas profundas. Será publicado um artigo sobre esse assunto. Resultados da estabilidade da praia vão ser transformados em outro artigo para publicação em livro.

### 6.2 Outras documentações

Existe uma descrição completa do modelo?	Sim – Manuais de Referência e Manuais do Usuário
Que outras anotações internas existem?	---
Onde os registros do projeto de modelagem estão salvos?	Notebook pessoal (Charline Dalinghaus) HD Pessoal (Charline Dalinghaus) PC – LOG HD Externo (Projeto SMC Brasil)  Todos em:

	“..\CHARLINE\01_MESTRADO_CHARLINE_2013-2015”
--	--

## APÊNDICE B

### **MODELO CONCEITUAL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS (LONGO PRAZO)**

#### **-Objetivo da Modelagem**

Calcular o transporte de sedimentos em escala de décadas das praias Barra da Lagoa – Moçambique e Ingleses, na Ilha de Santa Catarina.

#### **- Processos envolvidos**

Execução do modelo Oluca, execução do modelo Copla, extrair os dados em pontos de controle, reconstruir a série de ondas (RBF), calcular o fluxo médio de energia, cálculo do  $D_{50}$ , cálculo quantitativo e direcional do transporte de sedimentos.

#### **-Escala temporal**

Escala de engenharia (décadas)

#### **- Escala Espacial**

Escala local (quilômetros – dentro da enseada)

#### **-Tipo de modelo**

Teórico

#### **- Aproximações**

No cálculo do transporte de sedimentos são utilizadas fórmulas empíricas que foram calibradas e validadas, porém, é apenas uma aproximação quando utilizada em locais com características diferentes dos locais onde foram calibrados.

#### **- Equação**

CERC (1984)

#### **- Resultados Esperados (Hipóteses)**

A partir da calibração e validação do transporte de sedimentos através de dados de linha de costa e sedimentos obtidos em campo, espera-se que a direção predominante de transporte seja de sul para norte devido a direção predominante de ondulações que geram correntes longitudinais e que haja transporte de sedimento significativo visto que

as duas enseadas da área de estudo se encontram em equilíbrio dinâmico.

## **MODELO CONCEITUAL FORMA EM PLANTA**

### **-Objetivo da Modelagem**

Calcular a estabilidade da forma em planta das praias Barra da Lagoa – Moçambique e Ingleses, na Ilha de Santa Catarina.

### **- Processos envolvidos**

Execução do modelo Oluca, execução do modelo Copla, extrair os dados em pontos de controle, reconstruir a série de ondas (RBF), calcular o fluxo médio de energia, comprimento da praia, cálculo da forma em planta.

### **-Escala temporal**

Escala de engenharia (anos à décadas)

### **- Escala Espacial**

Escala local (quilômetros – dentro da enseada)

### **-Tipo de modelo**

2DH (2 dimensões na horizontal)

### **- Aproximações**

Sendo a única equação da forma em planta que utiliza parâmetros da geometria e da dinâmica da enseada como o ponto de difração e a direção predominante de onda, a equação parabólica da forma em planta (HSU; EVANS, 1989) é a mais utilizada. Porém inferir esses pontos pode ser subjetivo devido a dinâmica natural dos sistemas costeiros. Dessa forma González e Medina (2001) propuseram localizar esses pontos através do fluxo médio de energia das ondas e do cálculo do  $\alpha_{min}$ .

### **- Equação**

Forma em planta: Hsu e Evans (1989) modificada por González e Medina (2001)

### **- Resultados Esperados (Hipóteses)**

Espera-se pelo modelo que a praia da Barra da Lagoa - Moçambique apresente uma linha de costa prevista diferente da atual classificando a estabilidade do perfil praiar como dinâmico condizente com a literatura. A forma em planta estável da praia deve ser definida de acordo com as direções de ondas predominantes de sul/sudeste. Para a praia dos Ingleses espera-se encontrar o mesmo resultado, porém diferentemente do resultado que foi proposto na literatura (praia próxima ao equilíbrio estático) devido a erosão que ocorre na parte sudeste da mesma.

### **MODELO CONCEITUAL PERFIL PRAIAL DE EQUILÍBRIO**

#### **-Objetivo da Modelagem**

Calcular o perfil praiar de equilíbrio das praias Barra da Lagoa – Moçambique e Ingleses, na Ilha de Santa Catarina.

#### **- Processos envolvidos**

Execução do modelo Oluca, execução do modelo Copla, extrair os dados em pontos de controle, reconstruir a série de ondas (RBF), cálculo do  $D_{50}$ , geometria do perfil, cálculo do perfil praiar.

#### **-Escala temporal**

Escala de engenharia (anos à décadas)

#### **- Escala Espacial**

Escala local (metros – vários perfis ao longo da enseada)

#### **-Tipo de modelo**

2DV (2 dimensões na vertical)

#### **- Aproximações**

Assume-se que a direção de ondas será constante, pois o perfil se ajusta ao clima médio de ondas.

Assume-se um tamanho de grão médio para diferentes setores da enseada de forma a representar perfis com características próximas.

#### **- Equação**

Perfil praiar de equilíbrio: Bruun (1954) e Dean (1977)

#### **- Resultados Esperados (Hipóteses)**

Ao assumir que a direção de ondas será constante, a direção predominante de sul/sudeste é a que deve moldar o perfil.

Espera-se que o modelo apresente uma forma média de perfil praial em equilíbrio para os anos analisados, onde apesar da escala ser em longo prazo, assume-se uma média das modificações no perfil em escala instantânea.